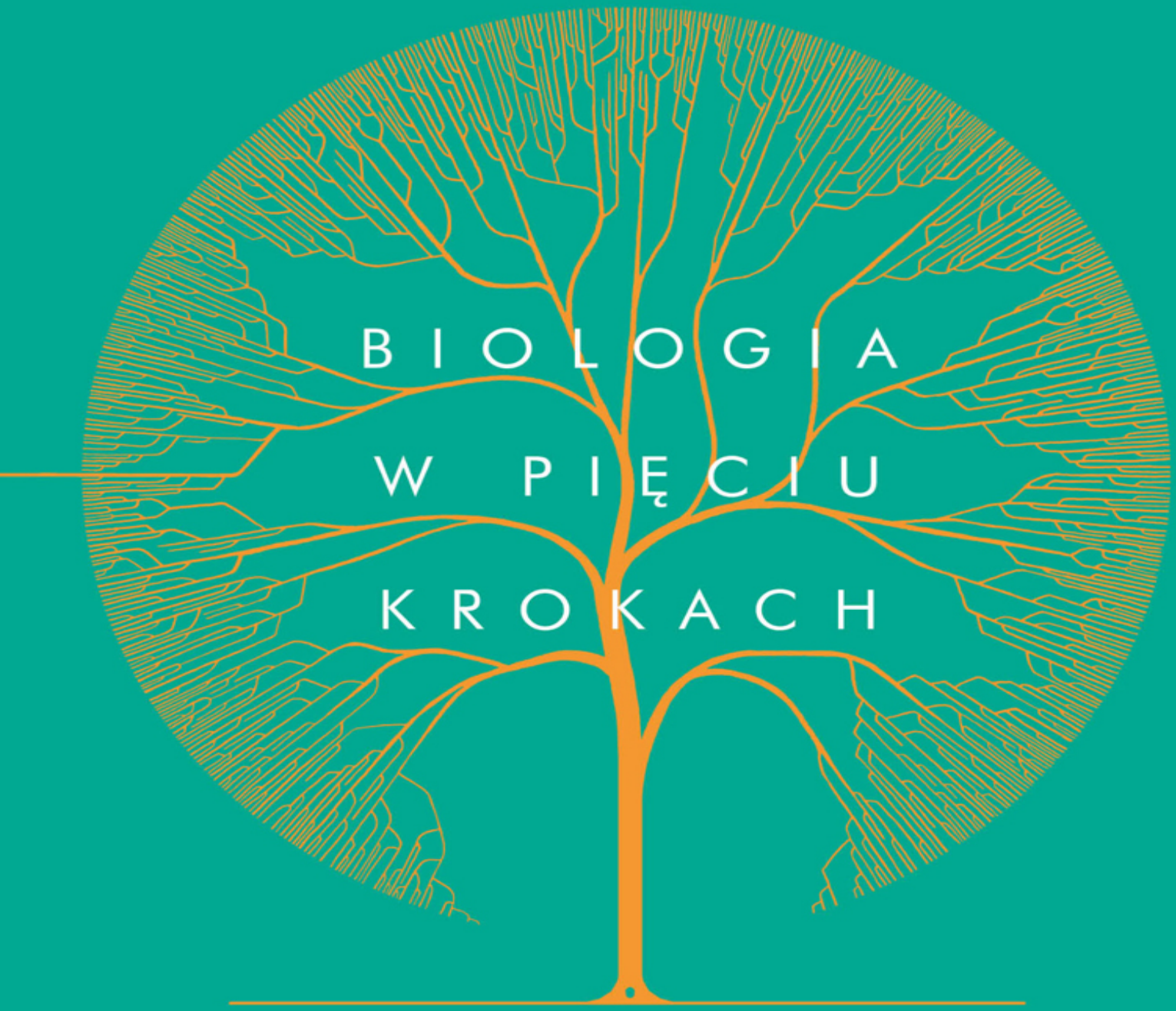
CZYM JEST ŻYCIE?



BIOLOGIA W PIĘCIU KROKACH

LAUREAT NAGRODY NOBLA

PAUL NURSE

MARGINESY

Plik jest zabezpieczony znakiem wodnym

Paul Nurse

Czym jest życie?

Biologia w pięciu krokach

PRZEŁOŻYŁA Aga Zano

MARGINESY

Spis treści

Karta redakcyjna

Dedykacja

Wstęp

1. Komórka
Atom biologii

2. Gen
Próba czasu

3. Ewolucja drogą doboru naturalnego
Przypadek i konieczność

4. Życie jako proces chemiczny
Porządek z chaosu

5. Życie jako proces przetwarzania informacji
Wspólne działanie

Zmienianie świata

Czym jest życie?

Podziękowania

O autorze

Przypisy

Tytuł oryginału *What Is Life?*
Przekład AGA ZANO

Wydawca ALICJA GAŁANDZIJ
Redaktor prowadzący ADAM PLUSZKA
Redakcja KAROLINA WĄSOWSKA
Korekta KRYSTIAN GAIK, JAN JAROSZUK
Projekt okładki PAUL DUFFIELD
Adaptacja projektu okładki ANNA POL
Opracowanie graficzne i typograficzne, łamanie manufaktura | manufaktu-ar.com

Copyright © Paul Nurse, 2020
First published in Great Britain in 2020 as *What Is Life?*
By David Fickling Books, 31 Beaumont Street, Oxford, OX1 2NP, UK
Copyright © for the translation by Aga Zano
Copyright © for the Polish edition by Wydawnictwo Marginesy,
Warszawa 2020

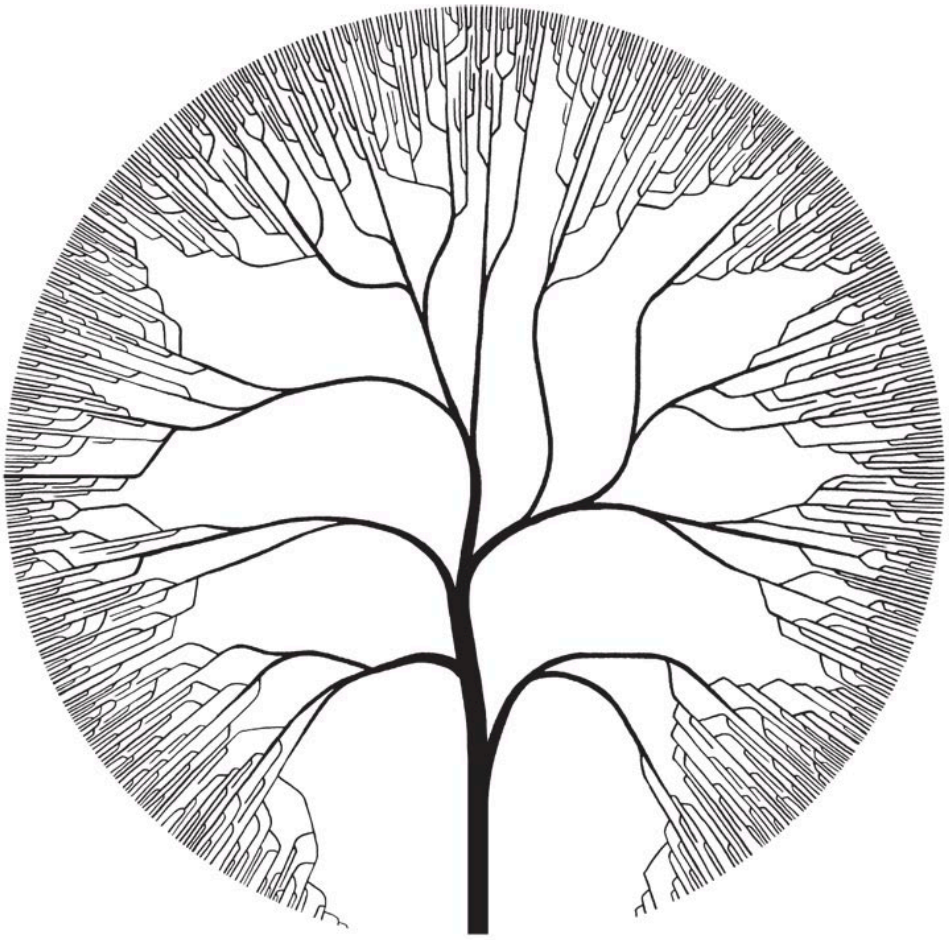
Warszawa 2020
Wydanie pierwsze

ISBN 978-83-66500-93-8

Wydawnictwo Marginesy Sp. z o.o.
ul. Mierosławskiego 11A
01-527 Warszawa
tel. 48 22 663 02 75
e-mail: redakcja@marginesy.com.pl
www.marginesy.com.pl

Konwersja: eLitera s.c.

Dla mojego przyjaciela i ojca,
Andy’ego „Yoga” Martynogi,
oraz wnucząt: Zoe, Josepha, Owena, Joshuy
i całego ich Pokolenia,
które będzie musiało zaopiekować się
Życiem na naszej planecie



Wstęp

Może to motyl sprawił, że zacząłem na poważnie interesować się biologią. Była wczesna wiosna, miałem dwanaście albo trzynaście lat i siedziałem właśnie w ogrodzie, kiedy nad płotem przeleciał rozedrgany żółty motylek. Zmienił kierunek, zawisł nade mną i przysiadł na chwilę w pobliżu – akurat na tyle długo, żebym zdążył dostrzec skomplikowane wzory żyłek i plamek na jego skrzydłach. Potem jednak odleciał, spłoszony jakimś cieniem, i zniknął za ogrodzeniem. Widok tego misternie stworzonego przez naturę owada skłonił mnie do myślenia. Motyl był stworzeniem skrajnie różnym ode mnie, a jednak podobnym. Nie miałem wątpliwości, że jest żywy, tak jak ja: poruszał się, korzystał ze zmysłów, potrafił reagować na otoczenie, a przy tym wydawało się, że wszystkie jego działania mają jasno określony cel. Zacząłem się zastanawiać: co to znaczy być żywym? Czym jest życie?

Rozmyślałem nad tym pytaniem przez dziesiątki lat, ale niełatwo znaleźć satysfakcjonującą odpowiedź. Może to nieco zaskakujące, ale nie istnieje jedna standardowa definicja życia, choć naukowcy od wieków próbują uporać się z tym zagadnieniem. Nawet tytuł tej książki – *Czym jest życie?* – został bezwstydnie podkradziony fizykowi Erwinowi Schrödingerowi, który w 1944 roku opublikował znaczący tekst pod takim samym tytułem. Skupił się w nim na jednym istotnym aspekcie życia: w jaki sposób żywe organizmy z pokolenia na pokolenie utrzymują tak imponująco jednolity kształt i porządek we wszechświecie, który – według drugiego prawa termodynamiki – nieprzerwanie zmierza do rozpadu i chaosu. Schrödinger miał rację, uznając to pytanie za niezwykle istotne. Badacz uważał, że rozwikłanie zagadki dziedziczenia – czym są geny i w jaki sposób przechodzą z pokolenia na pokolenie – jest kluczowe w pojęciu natury istnienia.

Zadaję to samo pytanie co Schrödinger, ale nie uważam, że rozszyfrowanie kwestii dziedziczności wystarczy do udzielenia

wyczerpującej odpowiedzi. Postanowiłem więc przyjrzeć się pięciu wielkim zagadnieniom biologii, traktując każde z nich jak kolejny krok do zrozumienia zasad działania życia. Większość tych kwestii jest nam od dawna znana i przyjmowana bez zastrzeżeń jako wyjaśnienie sposobu funkcjonowania żywych organizmów. Ja jednak postanowiłem połączyć je na nowe sposoby i wykorzystać do stworzenia ujednoliconego zestawu reguł definiujących życie. Mam nadzieję, że pomoże ci to spojrzeć na świat żywych organizmów z innej perspektywy.

Powinienem na samym początku zastrzec, że my, biolodzy, często uchylamy się od mówienia o wielkich ideach i teoriach. To odróżnia nas od fizyków. Czasami sprawiamy wrażenie ludzi lepiej czujących się w szczegółach, zakopanych w katalogach i opisach – może to być tworzenie spisów wszystkich gatunków zamieszkujących dany habitat, liczenie włosków na odnóżu chrząszcza czy sekwencjonowanie tysięcy genów. Być może to właśnie ta oszałamiająca, wręcz przytłaczająca różnorodność natury utrudnia poszukiwanie prostych, jednoznacznych teorii. Nie znaczy to jednak, że w biologii nie ma idei obejmujących całość tej dziedziny wiedzy – owszem, one też istnieją i pomagają nam zrozumieć życie w ogromie jego złożoności.

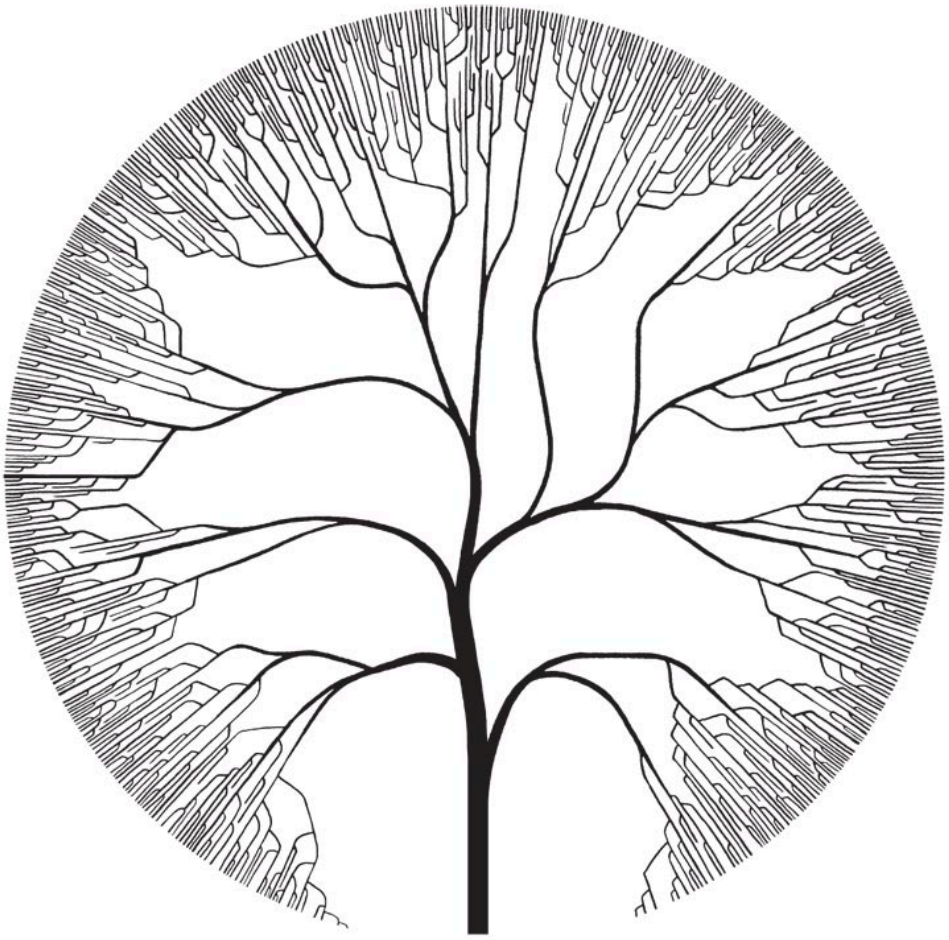
Omówię w tej książce pięć zagadnień: komórki, geny, ewolucję drogą doboru naturalnego, życie jako proces chemiczny i jako proces zapisu informacji. Wyjaśnię, skąd wzięły się te idee, dlaczego są ważne i jak się ze sobą splatają, ale zależy mi też na pokazaniu, że są zmienne, a naukowcy wciąż je rozwijają i dokonują nowych odkryć. Podzielę się też opowieściami o swoich własnych doświadczeniach w laboratorium, o przeczuciach, frustracji, szczęśliwych trafach i rzadkich, lecz jakże wspaniałych momentach prawdziwie świeżych spostrzeżeń. Chcę sprawić, że też poczujesz radość, jaka towarzyszy nam w chwilach naukowych przełomów, i doświadczysz satysfakcji, jaka płynie z lepszego rozumienia świata natury.

Działalność człowieka popycha klimat naszej planety i wiele funkcjonujących na niej ekosystemów do krańców wytrzymałości –

a czasami nawet poza jej granice. Aby ocalić życie na Ziemi w jego dotychczasowym kształcie, potrzebujemy jak najgłębszej wiedzy o świecie żywych organizmów. Dlatego w nadchodzących latach i dekadach biologia będzie w coraz większym stopniu kontrolować naszą codzienność – to, jak się rodzimy, odżywiamy, chronimy przed pandemiami i leczymy choroby. Opiszę niektóre z zastosowań wiedzy biologicznej, trudne kompromisy, wątpliwości etyczne i nieprzewidziane konsekwencje, do jakich mogą doprowadzić. Zanim jednak włączymy się do coraz powszechniejszych debat wokół tych zagadnień, musimy się zastanowić, czym jest życie i jak działa.

Mieszkamy w potężnym, imponująco złożonym wszechświecie, ale to właśnie życie pulsujące w naszym maleńkim zakątku kosmosu stanowi jedną z jego najbardziej fascynujących tajemnic. Dlatego przeprowadzę cię przez pięć idei, które posłużą za kolejne kroki na drodze stopniowego odkrywania reguł ustanawiających życie na Ziemi. To pomoże nam też zastanowić się, co dało początek życiu na naszej planecie i jak mogłoby ono wyglądać w innych częściach wszechświata. Nieważne, jaką wiedzą dysponujesz – może nawet wydaje ci się, że twoja znajomość nauk ścisłych jest znikoma albo równa zeru – po lekturze tej książki uświadomisz sobie, co łączy ciebie, mnie, delikatnego żółtego motyla i wszystkie żywe stworzenia na świecie.

Mam nadzieję, że wspólnie zbliżymy się do zrozumienia, czym jest życie.



1
Komórka

Atom biologii

Pierwszy raz zobaczyłem komórkę w szkole, niedługo po spotkaniu z żółtym motylem. Rozmnażaliśmy w klasie sadzonki cebuli, a potem wtykaliśmy korzonki pod szkiełko mikroskopu, żeby się przekonać, z czego się składają. Keith Neal, nasz charyzmatyczny nauczyciel biologii, wyjaśnił, że przez okular mikroskopu zobaczymy komórki – podstawową jednostkę życia. I rzeczywiście: ujrzałem schludne kolumny pudełkowatych komórek, ciągnące się w zgrabnie uporządkowanych szeregach. Byłem zdumiony, że rozrost i podział tych maleńkich komórek wystarczy do przepchnięcia korzeni cebuli przez glebę, by dostarczyć rozwijającej się roślinie wody i składników odżywczych, a przy tym mocno zakotwiczyć ją w ziemi.

Im więcej uczyłem się o komórkach, tym bardziej rósł mój zachwyt. Komórki występują w niesamowitej różnorodności kształtów i rozmiarów. Większości nie da się dostrzec gołym okiem – są mikroskopijnie małe. Komórki pewnej odmiany pasożytniczej bakterii odpowiedzialnej za infekcje pęcherza mają tak niewielkie rozmiary, że trzy tysiące ustawionych jedna przy drugiej stworzą szereg długości jednego milimetra. Inne są jednak ogromne. Żółtko jajka, które być może zjadłeś lub zjadłaś dziś na śniadanie, to tylko jedna komórka. W naszych ciałach też znalazłoby się kilka takich olbrzymek. Mamy na przykład pojedyncze komórki nerwowe, ciągnące się od końca kręgosłupa aż do czubka dużego palca u nogi. To znaczy, że osiągają około metra długości!

Ta mnogość form jest zdumiewająca, ale mnie najbardziej interesuje, co wszystkie komórki mają ze sobą wspólnego. Ludzie nauki zawsze dążą do identyfikowania najbardziej podstawowych modułów materii. Atomem biologii jest komórka. To nie tylko najprostsza „cegiełka” struktury wszystkich żywych organizmów, ale też fundamentalna jednostka życia. Na tym polega teoria komórkowa, opisująca je jako najmniejsze cząstki posiadające główne cechy żywego organizmu: wedle naszej wiedzy

wszystko, co żyje na Ziemi, jest albo komórką, albo ich zbiorem, a zatem są one najprostszą jednostką, którą można opisać jako żywą.

Teoria komórkowa liczy sobie około stu pięćdziesięciu lat i stanowi jeden z najistotniejszych fundamentów współczesnej biologii. Dziwne, że nie poruszyła ona wyobraźni ogółu w większym stopniu, wziąwszy pod uwagę to, jak ważna jest dla rozumienia biologii. Może dlatego, że w szkole komórki są zazwyczaj opisywane jako cegiełki, z których powstają bardziej skomplikowane organizmy – rzeczywistość jest jednak o wiele bardziej interesująca.

Historię badań tego zagadnienia zapoczątkował w 1665 roku Robert Hooke, członek świeżo założonego Towarzystwa Królewskiego w Londynie, jednej z pierwszych akademii nauk na świecie. I jak to się często zdarza w nauce, Hooke zawdzięczał swój sukces nowym zdobyczom technologii. Ponieważ większość komórek jest zbyt mała, by dostrzec je gołym okiem, musiały poczekać na odkrycie do czasu wynalezienia mikroskopu pod koniec XVI wieku. Ludzie nauki nierzadko łączą talent do teorii i rzemiosła – Hooke'owi nie można było odmówić żadnego z nich. Przecieranie szlaków w dziedzinach fizyki, architektury czy biologii przychodziło mu z równą łatwością, co konstruowanie urządzeń do badań. Budował własne mikroskopy, z których następnie korzystał, by poznawać niezwykłe światy, dotąd ukryte przed ludzkim spojrzeniem.

Jednym z przedmiotów, jakie oglądał Hooke, był cienki plasterek korka. Badacz zaobserwował, że drzewo korkowe składa się z rzędów jamek otoczonych ściankami, bardzo podobnych w budowie do siatkowatych wzorów korzonków cebuli, które trzysta lat później miałem oglądać w szkole. Hooke nazwał te segmenty komórkami – od łacińskiego słowa *cella*, oznaczającego celę bądź pokoik. Wtedy Anglik jeszcze nie wiedział, że struktura, którą ujrzał, stanowi podstawowy budulec nie tylko wszystkich roślin, lecz także każdej innej żywej istoty.

Niedługo później niderlandzki naukowiec Antonie van Leeuwenhoek dokonał kolejnego przełomu – odkrył organizmy jednokomórkowe. Dostrzegł te mikroskopijne formy życia w próbkach wody ze stawu

i osadzie, który zdrapał sobie z zębów: ta obserwacja poważnie go zaniepokoiła, bo szczycił się nienaganną higieną jamy ustnej! Nadał tym maleńkim stworzeniom urocze miano *animalcules*, czyli „żyjątek”, choć dziś nikt już nie używa tego terminu w pracach naukowych. Drobnoustroje panoszące się na jego zębach były pierwszymi opisanymi bakteriami w dziejach ludzkości. Leeuwenhoek natrafił na całą domenę maleńkich jednokomórkowych form życia.

Wiemy już, że bakterie i inne organizmy mikrobiologiczne (inaczej „mikroby”, czyli jednokomórkowce) to najpowszechniejsza i najbardziej zróżnicowana grupa żywych istot na Ziemi. Zamieszkują one wszystkie środowiska, od wysokich warstw atmosfery po głębiny skorupy ziemskiej. Bez nich życie by nie istniało. Jednokomórkowce rozkładają odpady, wzbogacają glebę, wprowadzają do ponownego obiegu składniki odżywcze i wychwytują z powietrza azot, potrzebny roślinom i zwierzętom do rozwoju. Naukowcy odkryli też, że na 30 bilionów komórek człowieka przypada co najmniej jeden mikroorganizm. Nikt z nas nie jest odrębną, indywidualną całością, lecz ogromną i nieustannie się zmieniającą kolonią ludzkich i nie-ludzkich komórek. Te mikroskopijne bakterie i grzyby żyją na nas i wewnątrz nas, wpływając na to, jak trawimy pokarm i walczymy z chorobami.

Przed XVII wiekiem nikt jednak nie miał pojęcia, że takie niewidzialne komórki w ogóle istnieją, a co dopiero funkcjonują na takich samych zasadach jak wszystkie większe formy życia.

W XVIII i na początku XIX wieku mikroskopy i techniki mikroskopowe zostały znacząco udoskonalone, więc wkrótce naukowcy byli w stanie rozpoznawać komórki najróżniejszych stworzeń. Niektórzy spekulowali, że wszystkie rośliny i zwierzęta są zbudowane ze zbiorów „żyjątek”, które Leeuwenhoek dostrzegł kilka pokoleń wcześniej. Aż wreszcie, po długim okresie inkubacji, narodziła się teoria komórkowa. W 1893 roku botanik Matthias Schleiden i zoolog Theodor Schwann opisali wyniki pracy swojej i wielu innych badaczy, po czym stwierdzili: „Zaobserwowaliśmy, że wszystkie organizmy są zbudowane z takich samych elementów, jakimi są

komórki”. Nauka doszła do przełomowego wniosku, że komórka stanowi podstawową jednostkę strukturalną życia.

Konsekwencje płynące z tego odkrycia zaszły jeszcze dalej, gdy biolodzy zorientowali się, że każda komórka stanowi indywidualną formę życia. Tę ideę opisał pionier patologii Rudolf Virchow w 1858 roku, stwierdzając, że „każde zwierzę stanowi sumę wielu cząstek witalnych, noszących w sobie wszystkie znamiona życia”.

To oznacza, że komórki same w sobie są żywe. Biolodzy udowadniają to najbardziej obrazowo, kiedy wyodrębniają je z organizmów zwierząt lub roślin i utrzymują przy życiu na szkiełkach albo w płaskich plastikowych naczynkach, zwanych szalkami Petriego. Niektóre z takich linii komórkowych są hodowane w laboratoriach na całym świecie przez dekady. Dzięki nim naukowcy mogą badać procesy biologiczne bez konieczności zajmowania się bardziej skomplikowanymi organizmami. Komórki są aktywne: potrafią się poruszać i reagować na otoczenie, a ich zawartość podlega ciągłym przemianom. Mogą się wydawać czymś bardzo prostym w zestawieniu z organizmami wielokomórkowymi, takimi jak zwierzęta i rośliny, ale niezaprzeczalnie są żywymi bytami.

W teorii komórkowej sformułowanej przez Schleidena i Schwanna brakowało istotnego elementu – nie było wiadomo, skąd się biorą nowe komórki. Ten brak został wypełniony, gdy biolodzy zauważyli, że komórki reprodukują się przez podział jednej na dwie, i doszli do wniosku, że komórki powstają tylko w wyniku podwojenia się tej istniejącej wcześniej. Virchow spopularyzował tę ideę łacińską sentencją: *Omnis cellula e cellula*, czyli: „Każda komórka pochodzi z komórki”. Ta maksyma pomogła też w zwalczeniu niezgodnej z prawdą, lecz wciąż popularnej w tamtych czasach idei, że życie wyłania się spontanicznie z materii nieożywionej – nic podobnego.

Podział komórek stanowi podstawę wzrostu i rozwoju wszystkich żywych organizmów. To pierwszy, najistotniejszy krok na drodze do przeistoczenia się zapłodnionego zwierzęcego jajeczka – jednego z wielu identycznych – w zbitkę komórek, a później w skomplikowany

i precyzyjnie skonstruowany twór, jakim jest zarodek. Wszystko zaczyna się od podziału jednej komórki na dwie, które mogą następnie przyjąć różne tożsamości. Cały odbywający się później rozwój embrionu polega na tym samym procesie podziału kolejnych komórek, w wyniku czego powstaje skomplikowany organizm, a komórki zaczynają tworzyć coraz bardziej wyspecjalizowane tkanki i narządy. To znaczy, że wszystkie żywe organizmy, bez względu na swój rozmiar i złożoność, zaczynają się od jednej takiej cegiełki. Wszyscy mielibyśmy do nich więcej szacunku, gdybyśmy pamiętali, że każdy z nas był kiedyś pojedynczą komórką, powstałą w wyniku połączenia plemnika z jajeczkiem w chwili zapłodnienia.

Podział komórek tłumaczy również pozorny cud, jakim jest samonaprawianie się ciała. Gdybyś zaciął się tą kartką, doszłoby do podziału komórek zlokalizowanych wokół skaleczenia. To zaś doprowadziłoby do naprawy uszkodzonego miejsca, by ciało pozostało zdrowe i sprawne. Zdolność ciała do inicjacji kolejnych podziałów komórek ma jednak także mroczną stronę – nowotwory. Nowotwór jest bowiem powodowany niekontrolowanym rozrostem i podziałem złośliwych komórek, które niszczą, a czasami nawet zabijają organizm.

Wzrost, naprawa, degeneracja i złośliwość – wszystkie te aspekty są powiązane ze zmianami właściwości naszych komórek w zdrowiu i chorobie, za młodu i na starość. Większość chorób wynika z niewłaściwego funkcjonowania komórek, więc zrozumienie przyczyn ich wadliwego działania pomaga opracowywać nowe sposoby leczenia.

Teoria komórkowa do dziś ma wpływ na trajektorię badań w naukach przyrodniczych i medycynie. Ukształtowała też – w radykalny sposób – moje własne życie. Odkąd w wieku trzynastu lat popatrzyłem przez okular mikroskopu na komórki korzonka cebuli, byłem zafascynowany naturą komórek i ich funkcjonowaniem. Gdy zostałem biologiem, postanowiłem badać właśnie komórki, a dokładnie to, jak się reprodukują i kontrolują swój podział.

W latach siedemdziesiątych zacząłem pracować z komórkami drożdży, które według większości ludzi nadają się tylko do produkcji wina, piwa albo chleba, a nie do wyjaśniania fundamentalnych zagadek biologii. Stanowią one jednak wspaniały model pozwalający zrozumieć, jak działają komórki organizmów bardziej złożonych od nich. Komórki drożdży są zaskakująco podobne do roślinnych i zwierzęcych, a przy tym małe, względnie nieskomplikowane, a karmione prostą pożywką rozwijają się szybko i bez wysokiego nakładu kosztów. W laboratoryjnych hodowlach zazwyczaj pływają sobie swobodnie w bulionie odżywczym albo rosną na warstwie galaretki w plastikowych spodkach, gdzie tworzą kilkumilimetrowe kolonie o beżowej barwie. Każda taka kolonia składa się z milionów komórek. Pomimo – albo raczej za sprawą – swojej prostoty komórki drożdży pomogły nam lepiej zrozumieć, jak dochodzi do podziału komórek w większości żywych organizmów, włączając w to człowieka. Wiele informacji o niekontrolowanym namnażaniu się komórek nowotworowych zawdzięczamy badaniom skromnych hodowli drożdży.

Komórki to najprostsza jednostka życia. Stanowią one pojedyncze żywe organizmy, otoczone membraną z lipidów przypominających tłuszcz. Ale tak jak atom składa się z elektronów i protonów, tak i komórki zawierają mniejsze komponenty. Nowoczesne mikroskopy są bardzo mocne i pozwalają biologom na odkrywanie misternych, nierzadko pięknych struktur wewnątrz komórek. Największe z nich to organelle – każde opakowane we własną membranę. Wśród organelli wyróżniamy jądro komórkowe, które stanowi centrum dowodzenia komórki, ponieważ zawiera informacje genetyczne zapisane w chromosomach. Mitochondria (w niektórych komórkach są ich setki) pełnią funkcję miniaturowych zasilaczy dostarczających komórce energii potrzebnej do rozwoju i przetrwania. Oprócz tego w komórkach znajduje się wiele innych zbiorników i narzędzi odpowiedzialnych za skomplikowane działania logistyczne, budowanie, rozbijanie bądź recykling poszczególnych elementów, a także wysyłanie materiału poza komórkę lub transportowanie go po jej wnętrzu.

Nie wszystkie żywe organizmy są stworzone z komórek o skomplikowanej wewnętrznej strukturze i zawierających oddzielone membranami organelle. Obecność lub brak opakowanego w membranę jądra komórkowego to kryterium podziału istot żywych na dwie główne kategorie. Organizmy, których komórki mają jądro – na przykład zwierzęta, rośliny i grzyby – to eukarionty. Natomiast te o komórkach bez jądra nazywamy prokariontami – należą do nich bakterie i archeony. Te ostatnie są podobne do bakterii pod względem rozmiarów i struktury, ale tak naprawdę to tylko ich dalecy krewni. W niektórych aspektach (na poziomie molekularnym) bliżej im do eukariontów, takich jak my, niż do bakterii.

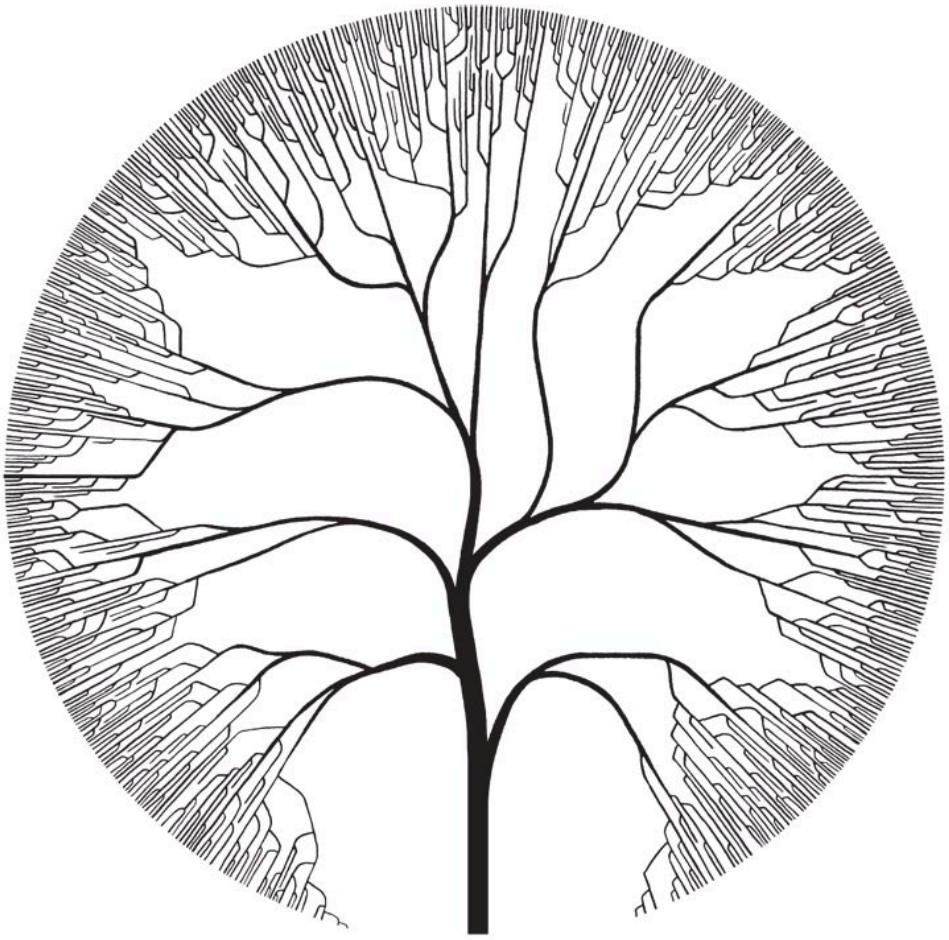
Niezależnie od tego, czy mowa o prokariontach czy eukariontach, najważniejszym elementem komórki jest błona komórkowa. Mimo że ma zaledwie dwie molekuły grubości, jest w stanie stworzyć elastyczną „ściankę” czy też barierę, która oddziela komórkę od otoczenia, a tym samym pozwala określić, co jest „na zewnątrz”, a co „wewnątrz”. Ta bariera jest kluczowa z uwagi na czynniki zarówno filozoficzne, jak i praktyczne. To dzięki niej wiemy, w jaki sposób świat żywych organizmów stawia opór dążeniu wszechświata w stronę rozpadu i chaosu. Za sprawą szczelnych błon komórki mogą ustanawiać i zachować porządek, którego potrzebują do funkcjonowania, a przy tym tworzyć chaos w najbliższym otoczeniu poza granicami swojej własnej istoty. Dzięki temu życie nie podważa drugiego prawa termodynamiki.

Wszystkie komórki są zdolne wykrywać zmiany w swoim wnętrzu i w otaczającym je świecie oraz reagować na nie. Zatem mimo że są oddzielone od środowiska, w którym żyją, pozostają z nim w bliskim kontakcie. Są też nieprzerwanie aktywne i bez przerwy pracują, by podtrzymać takie warunki w swoim wnętrzu, które pozwolą im przetrwać i się rozwijać. Ta cecha łączy je z innymi żywymi organizmami – takimi jak motyl, którego ujrzałem w dzieciństwie, a nawet my, ludzie.

Komórki mają wiele cech wspólnych ze wszystkimi zwierzętami, roślinami i grzybami. Rosną, reprodukują się, utrzymują przy życiu, a przy tym ich działania charakteryzuje celowość: imperatyw przetrwania

i podziału. Wszystkie komórki – od bakterii, które Leeuwenhoek znalazł między własnymi zębami, po neurony umożliwiające ci czytanie tych słów – łączą w sobie te cechy, właściwe każdemu żywemu stworzeniu. Zrozumienie działania komórek zbliża nas do pojęcia, jak działa życie.

Podstawą istnienia komórki są geny, i to właśnie im przyjrzymy się w następnym rozdziale. Służą one do kodowania instrukcji potrzebnych komórce do zbudowania i organizacji swojego wnętrza, a także muszą być przekazywane wszystkim kolejnym pokoleniom komórek i większych istot żywych w procesie reprodukcji.



2
Gen

Próba czasu

Mam dwie córki i czworo wnucząt. Wszyscy oni są cudownie wyjątkowi. Jedna z moich córek, Sarah, jest producentką telewizyjną, a druga – Emily – profesorką fizyki. Istnieją jednak cechy łączące je ze sobą, a także z ich dziećmi, ze mną i z moją żoną Anne. Rodzinne podobieństwa mogą być wyraziste lub subtelne: wzrost, kolor oczu, kształt warg lub nosa, a nawet różne gesty i wyrazy twarzy. Występują w wielu wariantach, ale więzi nie da się przeoczyć.

Obecność tych podobieństw między rodzicami a potomstwem to cecha definiująca wszystkie żywe organizmy. Dostrzegł to już Arystoteles i inni filozofowie klasyczni, ale podstawa tego biologicznego dziedzictwa osnuta była nieustępliwą mgłą tajemnicy. Przez lata szukano różnych wytłumaczeń – dziś niektóre z nich brzmią nieco absurdalnie. Arystoteles na przykład przypuszczał, że matki mają wpływ na rozwój swoich nienarodzonych dzieci tylko w takim stopniu, w jakim różne rodzaje gleby oddziałują na wzrost rośliny z nasienia. Inni myśliciele uważali, że kluczowe jest „mieszanie krwi”, czyli że dzieci dziedziczą mieszankę cech w równej mierze przekazanych przez ojca i matkę.

Dopiero odkrycie genów pozwoliło przetrzeć szlaki bardziej realistycznym wyobrażeniom procesu dziedziczenia. Geny nie tylko pomagają zrozumieć złożone mieszanki podobieństw i wyjątkowych cech spokrewnionych ze sobą osób, ale też stanowią istotne źródło informacji potrzebnych do powstawania, przetrwania i reprodukcji komórek, a zatem również złożonych z nich organizmów.

Gregor Mendel, opat zakonu augustianów w Brnie, jako pierwszy zdołał rozwikłać niektóre zagadki procesu dziedziczenia. Nie osiągnął tego jednak poprzez analizę skomplikowanych i często niezrozumiałych porządków cech u spokrewnionych ze sobą ludzi. Zamiast tego prowadził staranne eksperymenty na sadzonkach groszku ogrodowego, aż wysnuł wnioski,

które ostatecznie doprowadziły do odkrycia dobrze nam dziś znanych genów.

Mendel nie był pierwszym badaczem wykorzystującym eksperymenty naukowe do poszukiwania odpowiedzi na pytania o dziedziczenie ani nawet pierwszym, który użył do tego celu roślin. Jego poprzednicy opisywali, jak pewne właściwości roślin są przekazywane z pokolenia na pokolenie w sposób sprzeczny ze znaną im logiką. Potomstwo narodzone ze skrzyżowania dwóch różnych roślin czasami wyglądało jak ich mieszanka. Połączenie rośliny o, dajmy na to, białych kwiatach z drugą o fioletowych mogło doprowadzić do powstania rośliny o kwiatach różowych. W każdym pokoleniu pojawiały się jednak pewne cechy dominujące – na przykład potomstwo rodziców o białych i fioletowych kwiatach mogło mieć zawsze kwiaty barwy fioletowej. Pionierzy tej gałęzi wiedzy gromadzili wiele intrygujących wskazówek, ale żaden z nich nie zdołał na ich podstawie wykazać, jak działa dziedziczenie w świecie roślin, nie wspominając o przełożeniu tego schematu na wszystkie żywe istoty, włączając w to ludzi. Właśnie to wykazał Mendel w swojej pracy naukowej na temat hodowli groszku.

W 1981 roku, gdy zimna wojna trwała jeszcze w najlepsze, wybrałem się na pielgrzymkę do opactwa w Brnie, gdzie pracował Mendel. To było na długo, zanim laboratorium prekursora genetyki stało się atrakcją turystyczną. Zapuszczony ogródek okazał się zaskakująco duży. Bez trudu potrafiłem sobie wyobrazić grządki pełne równych rzędów groszku. Mendel podjął studia z dziedziny nauk przyrodniczych na Uniwersytecie Wiedeńskim i choć nie dotrwał do końca nauki, zostało mu trochę wiedzy zgromadzonej na uczelni. Doskonale zdawał sobie sprawę, że będzie potrzebował ogromnej liczby danych: w dużych próbach łatwiej dopatrzyć się istotnych schematów. Do niektórych eksperymentów wykorzystywał więc nawet dziesięć tysięcy różnych sadzonek groszku. Żaden badacz roślin przed Mendlem nie poważył się na tak rygorystyczne i szeroko zakrojone badania ilościowe.

Aby zminimalizować złożoność swoich eksperymentów, Mendel skupił się wyłącznie na cechach pokazujących jednoznaczne różnice. Przez lata starannie opisywał wyniki krzyżowania różnych roślin i dostrzegał schematy, które jego poprzednicy przeoczyli. A co najważniejsze, zauważył wyraźne proporcje arytmetyczne wśród sadzonek, które zachowywały bądź traciły pewne konkretne cechy, takie jak kolor kwiatów albo kształt nasion. Jednym z najistotniejszych dokonań Mendla było opisanie tych stosunków w szeregach. To z kolei doprowadziło go do stwierdzenia, że męski pyłek i żeńskie zalążki w kwiatach groszku zawierają „elementy" powiązane z różnymi cechami roślin rodziców. Kiedy łączą się one w procesie zapylenia, mają wpływ na kolejne pokolenie roślin. Mendel nie wiedział jednak, czym są te „elementy" ani jak działają.

Co ciekawe, zbieg okoliczności sprawił, że w tym samym czasie inny słynny biolog – Karol Darwin – badał krzyżówki lwich paszczy. On również zaobserwował prawidłowość w dziedziczeniu cech, ale nie próbował interpretować znaczenia tego faktu. Odkrycia Mendla zostały niemal całkiem zignorowane przez jego współczesnych. Dopiero w następnym pokoleniu zaczęto traktować jego pracę poważnie.

Wreszcie około roku 1900 inni biolodzy, niezależnie od siebie, potwierdzili w badaniach odkrycia mnicha, poddali je głębszej analizie i zaczęli spekulować, jak przebiega proces dziedziczenia. To doprowadziło do powstania teorii nazwanej na cześć naszego wizjonera mendelizmem oraz do narodzin współczesnej genetyki. Świat wreszcie zainteresował się jego badaniami.

Mendelizm to teoria przyjmująca, że cechy dziedziczone są zdeterminowane przez obecność fizycznych cząstek istniejących jako pary. Te cząsteczki, opisane przez Mendla jako „elementy", nazywamy dziś genami. Prawa Mendla nie wyjaśniają, czym dokładnie są te cząsteczki, ale bardzo dokładnie opisują, w jaki sposób dochodzi do ich dziedziczenia. A co najważniejsze, z czasem stało się jasne, że wnioski mnicha mają zastosowanie nie tylko w przypadku groszku, ale także wszystkich organizmów rozmnażających się płciowo, od drożdży po człowieka. Każdy

z twoich genów istnieje w parze, po jednym od każdego z biologicznych rodziców. Zostały one zapisane w plemniku i jajeczku, by połączyć się w chwili twojego poczęcia.

Odkrycia Mendla nie od razu padły na żyzny grunt, ale to nie znaczy, że w ostatnim trzydziestoleciu dziewiętnastego wieku nauka stała w miejscu. Badaczom udało się wreszcie uzyskać wyraźniejszy obraz komórek w trakcie podziału. Kiedy w końcu połączyli te obserwacje z prawem Mendla o dziedziczeniu cząstek, zaczęli sobie uświadamiać, jak istotną rolę w powstawaniu życia odgrywają geny.

Jedną z pierwszych wskazówek było odkrycie wewnątrz komórek mikroskopijnych struktur, przypominających maleńkie niteczki. Po raz pierwszy dostrzegł je w 1870 roku niemiecki fizyk (a później biolog komórkowy) Walther Flemming. Przy pomocy najbardziej zaawansowanych dostępnych mu mikroskopów zauważył, że owe niteczki zachowują się w szczególny sposób. Gdy komórka przygotowywała się do podziału, rozdwajały się wzdłuż swojej osi pionowej, a potem stawały się krótsze i grubsze. Następnie komórka dzieliła się na dwoje, a niteczki rozłączały, tak że w każdej komórce córce pozostawała tylko jedna z pary.

Flemming jeszcze nie całkiem rozumiał, że zaobserwował fizyczną postać genów, tych tajemniczych cząsteczek dziedziczenia opisanych przez prawa Mendla. Na to, co określił mianem „niteczek”, mówimy dziś chromosomy. Stanowią one fizyczne struktury obecne we wszystkich komórkach zawierających geny.

Mniej więcej w tym samym czasie z niespodziewanego źródła wyłoniła się kolejna istotna wskazówka o naturze genów i chromosomów: były nim zapłodnione jajeczka glist pasożytniczych. Kiedy belgijski biolog Eduard van Beneden uważnie przeanalizował najwcześniejsze stadia rozwoju glisty, zobaczył pod mikroskopem, że pierwsza komórka każdego nowo zapłodnionego zarodka zawiera cztery chromosomy, po dwa od jajeczka i plemnika.

Ta obserwacja dokładnie pokrywała się z założeniami mendelizmu – badacz miał przed oczami dwie pary genów, łączące się w chwili

zapłodnienia. Odkrycie van Benedena zostało od tamtej pory wielokrotnie potwierdzone. W jajeczku i plemniku znajduje się po połowie chromosomów, a pełna ich liczba kształtuje się, gdy obie te komórki łączą się w jedną, tworząc zapłodnione jajeczko. Dziś wiemy, że reguła kierująca rozmnażaniem płciowym glist obejmuje wszystkie eukariotyczne formy życia, łącznie z człowiekiem.

Liczba chromosomów różni się w zależności od organizmu: groszek ma ich 14 w każdej komórce, człowiek 46, a motyl *Polyommatus atlantica* z rodziny modraszkowatych – ponad 400. Na szczęście dla van Benedena u glisty są tylko cztery. Gdyby miała więcej, nie zdołałby ich tak łatwo policzyć pod mikroskopem. Dzięki uważnej obserwacji tego stosunkowo prostego organizmu naukowiec dostrzegł uniwersalną prawdę o dziedziczeniu genów. Wyjście od łatwego w interpretacji eksperymentu na nieskomplikowanym systemie biologicznym pozwala osiągnąć szerszą i ogólniejszą perspektywę na to, jak działa życie. Właśnie z tego powodu spędziłem większość swojej kariery na analizowaniu niezłożonych i łatwych w badaniu komórek drożdży zamiast bardziej zaawansowanych komórek ludzkich.

Po połączeniu odkryć Flemminga i van Benedena stało się jasne, że chromosomy przenoszą się zarówno między kolejnymi pokoleniami dzielących się komórek, jak i między całymi organizmami z nich stworzonymi. Poza kilkoma wyspecjalizowanymi wyjątkami (takimi jak czerwone krwinki, które w procesie dojrzewania tracą jądro komórkowe, a wraz z nim wszystkie geny) każda komórka w ciele zawiera kopię całego kodu genetycznego. Odgrywa on wielką rolę w tworzeniu kompletnego organizmu z jednej zapłodnionej komórki jajowej. W ciągu jego życia geny dostarczają komórkom najważniejszych informacji potrzebnych mu do prawidłowego rozwoju i funkcjonowania. Przy każdym podziale komórki komplet genów musi zostać powielony i rozdystrybuowany po równo między dwie nowe. Podział komórek stanowi więc fundamentalny przykład procesu reprodukcji.

Następnym wielkim wyzwaniem stojącym przed biologami było zrozumienie, czym właściwie są geny i jak działają. Pierwszego istotnego odkrycia dokonano w 1944 roku, kiedy mały zespół naukowców z Nowego Jorku pod kierownictwem mikrobiologa Oswalda Avery'ego przeprowadził eksperyment, który pozwolił na zidentyfikowanie substancji tworzącej geny. Avery i jego współpracownicy badali bakterie odpowiedzialne za rozwój zapalenia płuc. Wiedzieli, że łagodne szczepy mogą się przeistoczyć w niebezpieczne i zjadliwe, gdy połączą się z resztkami martwych komórek złośliwego szczepu. Co najważniejsze, zmiana była dziedziczna: kiedy bakterie raz stały się zjadliwe, nadawały tę właściwość wszystkim swoim potomkom. To doprowadziło Avery'ego do wniosku, że doszło do przekazania genu – lub genów – w formie jednostki chemicznej od martwych szkodliwych bakterii tym żywym i niegroźnym, co na zawsze zmieniało ich naturę. Zrozumiał, że jeśli zdoła namierzyć element martwych bakterii odpowiedzialny za transformację, wreszcie pokaże światu, z czego są zrobione geny.

Okazało się, że do przemiany prowadzi substancja nazwana kwasem deoksyrybonukleinowym, którą zapewne znasz pod postacią popularnego akronimu DNA. Naukowcy wiedzieli już, że chromosomy – odpowiedzialne za przenoszenie genów – wewnątrz komórek mają w sobie DNA, ale większość biologów uważała je za molekułę zbyt prostą i nieciekawą, by mogła odpowiadać za tak złożone zjawisko jak dziedziczenie. Bardzo się mylili.

Każdy z chromosomów zawiera pojedynczą, nierozdzieloną molekułę DNA. Te molekuły mogą być bardzo długie i zawierać setki, a nawet tysiące genów ułożone w łańcuchu. Na przykład drugi ludzki chromosom zawiera łańcuch ponad 1300 różnych genów, a gdyby rozciągnąć tę nitkę DNA, mierzyłaby ponad 8 centymetrów. To dowodzi niesamowitego faktu, że rozciągnięte DNA z 46 chromosomów w zaledwie jednej komórce twojego ciała miałoby ponad dwa metry długości. Jakimś cudem wszystkie te molekuły mieszczą się w komórce o przekroju nie większym niż kilka tysięcznych milimetra. To jeszcze nie wszystko – gdyby udało się nam

połączyć i rozciągnąć wszystkie ciasno zwinięte spirale DNA z kilku bilionów komórek w twoim ciele, stworzyłyby one cieniutką niteczkę o długości około 20 miliardów kilometrów. To 65 razy więcej niż z Ziemi na Słońce i z powrotem!

Oswald Avery był skromnym człowiekiem i nie obnosił się ze swoim odkryciem, podważanym zresztą przez niektórych biologów. Miał jednak rację – geny są zrobione z DNA. Kiedy ten fakt w końcu został zaakceptowany przez świat nauki, genetyka i biologia weszły na wyższy poziom rozwoju. Geny zaczęto wreszcie rozumieć jako jednostki chemiczne: stabilne zbiory atomów, podlegające prawom chemii i fizyki.

Jednak dopiero rozpracowanie struktury DNA w 1953 roku naprawdę otworzyło drzwi do nowej, wspaniałej epoki. Większość istotnych odkryć w dziedzinie biologii opiera się na pracy wielu naukowców i naukowczyń, zaglądających przez całe lata albo i dekady pod powłokę rzeczywistości. Czasami jednak do spektakularnego przełomu dochodzi o wiele szybciej – tak właśnie było z rozszyfrowaniem struktury DNA. W ciągu zaledwie kilku miesięcy troje badaczy z Londynu – Rosalind Franklin, Raymond Gosling i Maurice Wilkins – przeprowadziło prekursorskie eksperymenty, a następnie Francis Crick i James Watson z Cambridge przeanalizowali ich dane i wysnuli prawidłowe wnioski o strukturze DNA. Szybko też zrozumieli, jakie znaczenie ma to odkrycie dla pojmowania istoty życia.

W późniejszych latach udało mi się dobrze poznać Cricka i Watsona – stanowili dość kontrastującą parę. Francis Crick kierował się logiką i miał intelekt jak brzytwa. Rozkrawał problemy na coraz mniejsze kawałeczki, aż zupełnie znikały pod jego uważnym spojrzeniem. James Watson natomiast wyróżniał się niezwykłą intuicją i potrafił twórczo wyciągać wnioski, na jakie nie wpadli jego współpracownicy, choć nie zawsze dawało się dokładnie prześledzić proces jego rozumowania. Obaj byli pewni siebie i nie owijali w bawełnę. Nie stronili od wygłaszania krytycznych uwag, ale bardzo chętnie pracowali z młodszymi od siebie. W duecie robili nie lada wrażenie.

Prawdziwe piękno zaprezentowanej przez nich podwójnej helisy DNA nie kryje się w smukłej elegancji jej spiralnej konstrukcji. Ciekawsze jest to, jak ta struktura wyjaśnia dwa najważniejsze warunki, konieczne, by życie mogło przetrwać i dalej się rozwijać. Po pierwsze, DNA musi kodować informacje, jakich potrzebują komórki i całe organizmy do rozwoju, utrzymania się przy życiu i reprodukcji. Po drugie, musi ono być w stanie precyzyjnie i stabilnie się replikować, tak by każda nowa komórka i organizm dziedziczyły komplet instrukcji genetycznych.

Spiralna struktura DNA, przypominająca drabinę w formie korkociągu, umożliwia obie te funkcje. Zastanówmy się, w jaki sposób DNA przenosi informacje. Szczeble drabiny DNA formujące się między parą włókien to zasady azotowe. Istnieją zaledwie cztery rodzaje tych zasad: adenina, tymina, guanina i cytozyna, zazwyczaj opisywane skrótowo literami A, T, G i C. Porządek, w jakim te cztery zasady pojawiają się między włóknami drabiny DNA, stanowi kod zapisu informacji genetycznej. Ten proces nie różni się od przekazywania informacji za pomocą ciągów liter, które właśnie czytasz. Każdy gen to określony odcinek kodu DNA, zawierający komunikat dla komórki. Może to być na przykład instrukcja, by organizm produkował pigment odpowiedzialny za kolor oczu, tworzył fioletowe komórki kwiatów groszku albo zmienił łagodną bakterię w zjadliwy szczep wywołujący zapalenie płuc. Komórka „odczytuje” komunikaty zapisane w kodzie genetycznym i podejmuje odpowiednie działania.

Nie zapominajmy, że DNA musi się też wiernie kopiować, by wszystkie zawarte w genach informacje przechodziły z jednego pokolenia komórek lub organizmów do następnego. Kształt i właściwości chemiczne dwóch zasad azotowych tworzących każdy szczebel drabiny DNA sprawiają, że mogą się one połączyć tylko w jeden konkretny sposób. Zasada A może stworzyć parę wyłącznie z T, a G tylko z C. To oznacza, że jeśli znamy układ zasad wzdłuż jednego włókna DNA, natychmiast zorientujemy się, jakie zasady azotowe odpowiadają im po drugiej stronie. Jeśliby rozdzielić helisę na dwie nici, każda z nich może posłużyć za szablon umożliwiający

odtworzenie idealnej kopii utraconego drugiego włókna. Kiedy tylko Crick i Watson zaobserwowali tę szczególną budowę DNA, zrozumieli, że to w ten sposób komórki kopiują go, by tworzyć nowe chromosomy, a zatem również geny.

Geny mają ogromny wpływ na zachowanie komórek, a zatem również całych organizmów, poprzez instruowanie komórek, w jaki sposób mają budować różne białka. Ta informacja jest fundamentalna dla powstania życia, bo to właśnie białka wykonują największą pracę wewnątrz komórki – większość jej enzymów, struktur i systemów operacyjnych jest utworzona z protein. Aby osiągnąć ten cel, komórki dokonują przekładu między dwoma językami: czteroliterowym „alfabetem" DNA: A, T, G i C, oraz bardziej złożonym językiem białek, składającym się z uporządkowanych ciągów dwudziestu różnych cegiełek zwanych aminokwasami. Już na początku lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku naukowcy zrozumieli podstawy relacji między genami a białkami, lecz nikt nie wiedział, w jaki sposób komórka tłumaczy informacje z języka DNA na język protein.

Ten system przekładu z genów na białka jest nazywany kodem genetycznym – stanowił on dla biologów prawdziwe kryptograficzne wyzwanie. Na przełomie lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych pracującym kolejno naukowcom i naukowczyniom udało się wreszcie złamać ów kod. Najlepiej spośród nich znałem Francisa Cricka i Sydneya Brennera. Sydney był najbardziej błyskotliwym i niepokornym badaczem, jakiego kiedykolwiek zdarzyło mi się spotkać. Pewnego razu podczas rozmowy o pracę (której nie dostałem) opisywał swoich kolegów z laboratorium, porównując ich do zdeformowanych postaci na reprodukcji *Guerniki* Picassa wiszącej w jego gabinecie. Poczucie humoru Brennera opierało się na zderzaniu pozornie odległych skojarzeń – przypuszczam, że ta sama cecha odpowiadała za jego niewyczerpane pokłady twórczej energii w pracy naukowej.

Ci i inni genetyczni kryptolodzy wykazali, że alfabet DNA układa się w trzyliterowe „słowa" wzdłuż każdego włókna drabiny, zazwyczaj odpowiadające jednemu z konkretnych aminokwasów tworzących białko.

Na przykład układ GCT każe komórce dodać do nowej cząstki białka aminokwas zwany alaniną, a TGT żąda innego aminokwasu – cysteiny. Możemy zatem stwierdzić, że gen stanowi sekwencję haseł DNA potrzebnych do stworzenia konkretnej cząstki białka. Na przykład ludzki gen hemoglobiny beta (HBB) zawiera najważniejsze informacje o sobie w 441 literach DNA (czyli połączeniach zasad azotowych), które tworzą 147 trzyliterowych „wyrazów", przekładanych przez komórkę na molekułę białka o długości 147 aminokwasów. Białko globiny beta jest składnikiem hemoglobiny znajdującej się w czerwonych krwinkach, dzięki której nasze ciało utrzymuje się przy życiu, a krew ma czerwoną barwę.

Złamanie kodu genetycznego rozwiązało największą tajemnicę biologii. Odkryliśmy, w jaki sposób statyczne instrukcje przechowywane w genach mogą zmieniać się w aktywne molekuły białka, które tworzą i kontrolują żywe komórki. Rozszyfrowanie tej zagadki otworzyło drzwi do współczesnego świata, w którym biolodzy potrafią bez trudu opisywać, interpretować i modyfikować sekwencje genów. To odkrycie było tak istotne, że niektórzy biolodzy zrezygnowali z dalszych prac, uznając, że największy problem biologii komórkowej i genetyki został rozwiązany. Nawet Francis Crick zmienił kierunek badań i zainteresował się tajemnicami ludzkiej świadomości.

Minęło ponad pięćdziesiąt lat od tego odkrycia i nikt już się nie łudzi, że nasza praca na polu genetyki jest skończona. Biolodzy zrobili ogromne postępy. W ciągu zaledwie jednego wieku gen – z początku tylko abstrakcyjna cząsteczka – radykalnie zmienił swój wizerunek. Gdy w 1973 roku kończyłem pisać doktorat, nie był już mglistą ideą ani częścią chromosomu, lecz nicią zasad azotowych zapisujących w komórkach białka o bardzo precyzyjnych funkcjach i zadaniach.

Biolodzy wkrótce nauczyli się namierzać konkretne geny, izolować je, oczyszczać i przenosić z jednego chromosomu do drugiego, a nawet umieszczać w chromosomach innych gatunków. Na przykład we wczesnych latach osiemdziesiątych chromosomy bakterii *E. coli* zostały przebudowane tak, by zawierały ludzki gen kodujący białko insulinowe regulujące poziom

cukru we krwi. Te zmodyfikowane genetycznie bakterie wytwarzają ogromne ilości niedrogiej wersji białka insulinowego, identycznego jak to produkowane w ludzkiej trzustce, pomagając milionom ludzi chorujących na cukrzycę.

W latach siedemdziesiątych brytyjski biochemik Fred Sanger dokonał kolejnego przełomowego odkrycia – wynalazł sposób na „odczytywanie" informacji genetycznych. Skorzystał z pomysłowego połączenia reakcji chemicznych i metod fizycznych, identyfikując w ten sposób rodzaj i porządek sekwencji wszystkich połączeń zasad azotowych tworzących gen (ten proces nazywamy dziś sekwencjonowaniem DNA). Liczba zasad w genach może być bardzo różna – od kilkuset do wielu tysięcy – a zdobycie umiejętności odczytywania ich i przewidywania, jakie białko stworzą, stanowiło wielki krok naprzód. Fred, człowiek równie skromny, co zasłużony dla nauki, otrzymał za swoje odkrycia dwie Nagrody Nobla!

Pod koniec dwudziestego wieku potrafiliśmy już sekwencjonować całe genomy (czyli kompletne zestawy materiału genetycznego zawarte w komórce lub organizmie), również nasze własne. W 2003 roku po raz pierwszy dokonano mniej więcej kompletnego sekwencjonowania wszystkich trzech miliardów liter DNA ludzkiego genomu. To był przełom dla biologii i medycyny, a od tamtej pory nauka wciąż robi postępy. Sekwencjonowanie tego pierwszego genomu trwało ponad dekadę i kosztowało ponad dwa miliardy funtów szterlingów, dzisiaj zaś potrzeba na to zaledwie jednego lub dwóch dni i kilkuset funtów.

Najważniejszym osiągnięciem pierwszego projektu sekwencjonowania ludzkiego genomu było stworzenie listy około 22 tysięcy genów kodujących białka, wspólnych dla wszystkich ludzi, które składają się na fundament naszego biologicznego dziedzictwa. Określają one zarówno cechy dzielone przez cały nasz gatunek, jak i te, które czynią nas wyjątkowymi na poziomie jednostkowym. Ta wiedza sama w sobie nie wystarcza, by wytłumaczyć, czym jest człowiek, ale bez niej nigdy nie zdołalibyśmy zrozumieć tego w pełni. Przypomina to tworzenie listy

bohaterów występujących w sztuce – jest ona potrzebna do napisania fabuły i znalezienia aktorów, którzy tchną w te postaci życie.

Proces podziału komórek odgrywa szczególną rolę w łączeniu idei „komórki” i „genu”. Za każdym razem, kiedy komórka dzieli się na dwie, wszystkie geny wszystkich chromosomów wewnątrz niej muszą najpierw zostać skopiowane, a następnie rozdzielone po równo między dwie komórki córki. Powielenie genów i podział komórki muszą zatem przebiegać w ścisłej synchronizacji. W przeciwnym razie komórki umierałyby albo funkcjonowały niewłaściwie, bo nie byłyby wyposażone w pełny zestaw potrzebnych instrukcji. Czynnikiem koordynującym te procesy jest cykl komórkowy organizujący przebieg narodzin każdej nowej komórki.

Do skopiowania DNA dochodzi na wczesnym etapie cyklu, podczas fazy S (syntezy DNA). Rozdzielenie świeżo powielonych chromosomów następuje później, w procesie mitozy. Dzięki temu każda z nowych komórek będzie mieć zapewniony własny kompletny zestaw genomów. Te zdarzenia w cyklu komórkowym ilustrują kolejny ważny aspekt istoty życia: wszystkie one zachodzą w wyniku bardzo złożonych reakcji chemicznych. Procesy te same w sobie nie mogą zostać uznane za przejaw życia: powstaje ono dopiero wtedy, kiedy setki reakcji potrzebnych do stworzenia nowej komórki wspólnie tworzą cały system realizujący konkretne zadanie. Właśnie taką rolę odgrywa cykl komórkowy: wraz z nim rozpoczyna się proces chemiczny replikacji DNA, a tym samym urzeczywistnia się cel, jakim jest podział komórki.

Analiza cyklu komórkowego stanowi fundamentalny krok w stronę zrozumienia natury życia – zacząłem to sobie uświadamiać w wieku dwudziestu kilku lat, gdy studiowałem na Uniwersytecie Wschodniej Anglii w Norwich. Szukałem projektu na następny etap kariery naukowej. Nie spodziewałem się jednak, że badanie, które zapoczątkuję w latach siedemdziesiątych, stanie się moją naukową pasją na resztę życia.

Podobnie jak większość procesów zachodzących w życiu komórki cykl komórkowy jest kontrolowany przez geny i białka przez nie produkowane. Z biegiem lat pracownikami mojego laboratorium zaczęła kierować jedna

nadrzędna ambicja: zidentyfikować geny odpowiedzialne za przebieg cyklu komórkowego i dowiedzieć się, jak działają. Wykorzystaliśmy do tego drożdże *S. pombe* (to gatunek stosowany we wschodniej Afryce do warzenia piwa), bo pomimo stosunkowo prostej budowy ich cykl komórkowy jest dość podobny do tych zachodzących w wielu innych organizmach, nawet u znacznie przewyższających je rozmiarami wielokomórkowców, takich jak człowiek. Postanowiliśmy znaleźć szczepy drożdży zawierające zmutowane formy genów uczestniczących w cyklu komórkowym.

W języku genetyków słowo „mutant" ma szczególne znaczenie. Zmutowany gen nie musi być zepsuty czy nietypowy; to po prostu inny jego wariant. Poszczególne rodzaje groszku, jakie krzyżował ze sobą Mendel – na przykład te z fioletowymi i białymi kwiatami – różniły się między sobą z powodu mutacji genu odpowiedzialnego za barwę płatków. Według tej samej zasady osoby o oczach rzadkiej barwy można uznać za odmianę człowieka zmutowaną w szczególny sposób. Często nie ma nawet sensu stwierdzać, które z wariantów należałoby uznać za „typowe" czy „normalne".

Mutacje zachodzą, kiedy sekwencja DNA w genie została zmieniona, przestawiona lub usunięta. To zazwyczaj konsekwencja naruszenia struktury komórki – na przykład za sprawą promieniowania ultrafioletowego lub uszkodzeń chemicznych – albo wynik błędów, jakie zdarzają się czasami w procesie podziału komórki i replikacji DNA. Każda komórka dysponuje zaawansowanymi mechanizmami, dzięki którym może namierzać i naprawiać większość takich błędów, dlatego też mutacje pojawiają się dość rzadko. Według niektórych szacunków przy każdym podziale komórek człowieka dochodzi do zaledwie trzech drobnych mutacji. To zdumiewająco niski odsetek błędu: zaledwie jedna na miliard liter DNA jest kopiowana niewłaściwie. Kiedy jednak mutacje się pojawiają, mogą spowodować powstanie innej formy genów, które będą produkować zniekształcone białka – te z kolei potrafią zmienić całą biologię dziedziczących je komórek.

Niektóre mutacje stanowią bardzo innowacyjny bodziec, zmieniający sposób działania genu – niekiedy jest to pożyteczne, ale często zdarza się, że mutacje nie pozwalają genowi właściwie spełniać swojej funkcji. Czasami zmiana tylko jednej litery DNA może mieć wielkie znaczenie. Wystarczy na przykład, by dziecko odziedziczyło dwie kopie pewnego wariantu genu globiny beta z zaledwie jedną zmianą w układzie zasad azotowych, by hemoglobina w jego organizmie miała nieprawidłową budowę, co skutkuje chorobą krwi zwaną anemią sierpowatą.

Aby zrozumieć, jak drożdże *S. pombe* kontrolują swój cykl komórkowy, szukałem szczepów niezdolnych do prawidłowego podziału. Uznałem, że jeśli znajdziemy zmutowane jednostki, zdołamy zidentyfikować geny potrzebne do odbycia się cyklu. Wspólnie z resztą zespołu zacząłem szukać zmutowanych drożdży, które nie są w stanie dzielić komórek, ale nadal się rozwijają. Łatwo było dostrzec je pod mikroskopem, bo rosły, nigdy się nie dzieląc, przez co stawały się wyjątkowo duże. Z biegiem lat – minęło ich ponad czterdzieści – zidentyfikowaliśmy ponad 500 takich powiększonych szczepów i rzeczywiście wszystkie zawierały mutacje dezaktywujące geny potrzebne do przeprowadzenia konkretnych działań w cyklu komórkowym. To oznacza, że w cykl ten jest zaangażowanych co najmniej 500 genów – około 10 procent wszystkich 5000 genów znajdujących się w genotypie drożdży *S. pombe*.

Zrobiliśmy spory postęp: stało się jasne, że komórka drożdży potrzebuje tych genów do przeprowadzenia cyklu komórkowego. Nie oznacza to jednak, że nim sterują. W samochodzie jest wiele części, których zepsucie nie pozwoli mu jechać dalej, na przykład koła, osie, podwozie, silnik. Oczywiście wszystkie są ważne, ale żadnego z nich kierowca nie używa do kontroli prędkości, z jaką porusza się pojazd. Dlatego zależało nam, by znaleźć w komórce odpowiedniki pedału gazu, skrzyni biegów i hamulców – geny kontrolujące to, jak szybko w komórce zachodzi cykl.

Na pierwszy z tych genów natrafiłem zupełnym przypadkiem. Doskonale pamiętam tę chwilę w 1974 roku, kiedy mozolnie szukałem pod mikroskopem kolejnych kolonii nietypowo powiększonych zmutowanych

komórek drożdży – męcząca robota, bo tylko jedna na dziesięć tysięcy kolonii przejawiała jakieś interesujące cechy. Potrzebowałem całego poranka albo popołudnia na znalezienie jednego zmutowanego okazu, a czasami nie udawało mi się dostrzec żadnego. Tamtego dnia zauważyłem jednak kolonię z nietypowo małymi komórkami. W pierwszej chwili pomyślałem, że do próbki musiały się dostać jakieś bakterie – to dość częsty problem. Przyjrzałem się im bliżej i uświadomiłem sobie, że to może być coś bardziej interesującego. Może mam do czynienia ze zmutowanymi drożdżami, które przemknęły przez cykl komórkowy, zanim zdążyły urosnąć, i po rozmnożeniu są mniejszych rozmiarów?

Okazało się, że moje rozumowanie jest właściwe; znalazłem w tych komórkach mutację genu odpowiedzialnego za to, jak szybko komórka może wejść w proces mitozy i podziału, by przeprowadzić cały cykl komórkowy. Właśnie takiego genu szukałem. Te komórki naprawdę przypominały auto z popsutym pedałem gazu, przez co pojazd jedzie szybciej. Ponieważ dokonałem tego odkrycia w Edynburgu, opisałem te niewyrośnięte komórki typowo szkockim słówkiem *wee mutants*, czyli „ciut-mutanty”. Muszę przyznać, że przez pół wieku ten żart nieco się wyświechtał!

Okazało się, że gen zmieniony w pierwszym ciut-mutancie współpracuje z innym, jeszcze ważniejszym, odpowiedzialnym za kluczowe procesy kontroli cyklu komórkowego. Tak się złożyło, że ten nieuchwytny drugi gen również znalazłem za sprawą szczęśliwego zbiegu okoliczności. Od miesięcy izolowałem różne szczepy małokomórkowych ciut-mutantów i z wielkim trudem zgromadziłem ich prawie pięćdziesiąt. To zadanie zajmowało mi jeszcze więcej czasu niż poszukiwania przerośniętych okazów: na znalezienie jednej takiej komórki potrzebowałem prawie tygodnia. To wyzwanie dodatkowo utrudniał fakt, że większość z tych szczepów, które zbierałem z takim wysiłkiem, była niezbyt ciekawa, bo stanowiły niemal identyczne mutacje jednego genu, który nazwałem *wee1*.

Aż wreszcie pewnego deszczowego piątkowego popołudnia namierzyłem kolejnego ciut-mutanta. Tym razem moja próbka bez dwóch zdań była

skażona: całą szalkę i karłowate komórki drożdży pokrywały długie nitki grzyba. Byłem zmęczony, a pozbycie się takiego intruza stanowiło długie i męczące zadanie. Uznałem, że ten nowy szczep i tak pewnie zawiera kolejną mutację genu *wee1*, więc wyrzuciłem próbkę do kosza na śmieci i poszedłem do domu na obiad.

Wieczorem jednak zaczęło mnie dręczyć poczucie winy. A co jeśli te komórki różniły się od poprzednich pięćdziesięciu? Zdążył już zapaść bardzo ciemny i deszczowy edynburski wieczór, ale wsiadłem na rower i pojechałem z powrotem pod górę do laboratorium. Kolejne tygodnie poświęciłem na izolowanie nowego ciut-mutanta z szalki opanowanej przez grzyb. Aż wreszcie, ku mojemu wielkiemu zadowoleniu, okazało się, że wcale nie mam do czynienia z kolejnym genem *wee1*. Trafiłem na zupełnie nowy gen, który ostatecznie rozwikłał zagadkę kontroli cyklu komórkowego.

Nazwałem go *cdc2*, od angielskiego zwrotu *cell division cycle*, czyli „cykl podziału komórki”. Okazał się on najważniejszym elementem mojej genetycznej łamigłówki i czasami żałuję, że nie nadałem mu jakiejś bardziej eleganckiej – albo przynajmniej charakterystycznej – nazwy. Choćby dlatego, że jeszcze nie raz przeczytasz o *cdc2* w tej książce.

Z perspektywy czasu wszystko to wydaje się dość nieskomplikowane – zarówno sam zamysł, jak i jego wykonanie. Wielką rolę odegrał też łut szczęścia: zarówno przypadkowe odnalezienie pierwszego ciut-mutanta, którego nawet nie szukałem, jak i chichot losu, który sprawił, że wyjęty ze śmietnika „nieudany” eksperyment okazał się tym przełomowym. Proste działania i pomysły bywają zaskakująco skuteczne, zwłaszcza w połączeniu ze sporą dozą mitręgi, nadziei i, oczywiście, od czasu do czasu szczęśliwych zbiegów okoliczności.

Większość tych eksperymentów przeprowadziłem jako młody naukowiec, który dopiero założył rodzinę. Pracowałem w laboratorium profesora Murdocha Mitchisona w Edynburgu. Użyczył mi on przestrzeni oraz sprzętu potrzebnych do przeprowadzania eksperymentów, a poza tym chętnie dzielił się radami i uwagami na temat mojej pracy. Mimo

ogromnego wkładu w moje odkrycia nie zgodził się, bym podpisał go jako współautora któregokolwiek z moich artykułów naukowych – uważał, że nie dość się im przysłużył. To oczywiście było dalekie od prawdy. Z taką szczodrością spotykałem się często w swojej karierze akademickiej, ale zauważyłem, że nieczęsto poświęca się jej należną uwagę. Murdoch był ciekawym człowiekiem. Skorym do pomocy, a przy tym cokolwiek nieśmiałym i bez reszty oddanym swoim badaniom. Nie obchodziło go, czy kogokolwiek interesuje jego praca; wytrwale kroczył własną ścieżką. Gdyby żył, być może nie chciałby znaleźć się w centrum zainteresowania, ale muszę oddać mu sprawiedliwość. To dzięki niemu zrozumiałem, że praca naukowa w swoim najlepszym wydaniu łączy głęboki indywidualizm i podejście na wskroś wspólnotowe.

Życie nie może istnieć bez genów: każde nowe pokolenie komórek i organizmów musi dziedziczyć informacje potrzebne do rozwoju, funkcjonowania i reprodukcji. To oznacza, że aby zapewnić organizmom przetrwanie, geny muszą się replikować bardzo starannie i precyzyjnie. Tylko w ten sposób da się podtrzymać jednolite wzory sekwencji DNA podczas wielokrotnych podziałów komórek – geny muszą przetrwać „próbę czasu”. Komórki opanowują tę sztukę ze zdumiewającą dokładnością, a wyniki ich działań są wszędzie wokół nas. Sekwencja DNA ogromnej większości 22 tysięcy genów kontrolujących twoje komórki jest niemal identyczna jak ta znajdująca się w komórkach wszystkich innych ludzi na naszej planecie. Jest ona też praktycznie nieodróżnialna od sekwencji naszych przodków, którzy polowali, zbierali plony i wymieniali się opowieściami przy ogniskach płonących w mrokach prehistorii, dziesiątki tysięcy lat temu. Mutacje odróżniające twoje cechy wrodzone od moich, a także nasze cechy wspólne od tych właściwych przodkom składają się na maleńki ułamek – nawet nie jeden procent – całości naszego kodu DNA. To jedno z największych odkryć genetyki w dwudziestym pierwszym wieku: nasze genomy, każdy długi na trzy miliardy liter DNA, są bardzo podobne, bez względu na płeć, narodowość, wyznanie czy klasę. To istotny fakt, który powinni uznać i docenić ludzie na całym świecie.

Nie możemy jednak zignorować tych rozproszonych wariacji, które nosimy w swoich genach. Stanowią one wprawdzie znikomą mniejszość, ale mimo to mogą wywierać duży wpływ na naszą biologię i historię życia na poziomie jednostkowym. Niektóre dzielę z córkami i wnuczętami, co tłumaczy pewne cechy składające się na nasze rodzinne podobieństwo. Inne warianty są wyjątkowe i czynią z nas niepowtarzalne jednostki, wpływając na nasz wygląd, stan zdrowia czy charakter – w sposób subtelny bądź bardzo oczywisty.

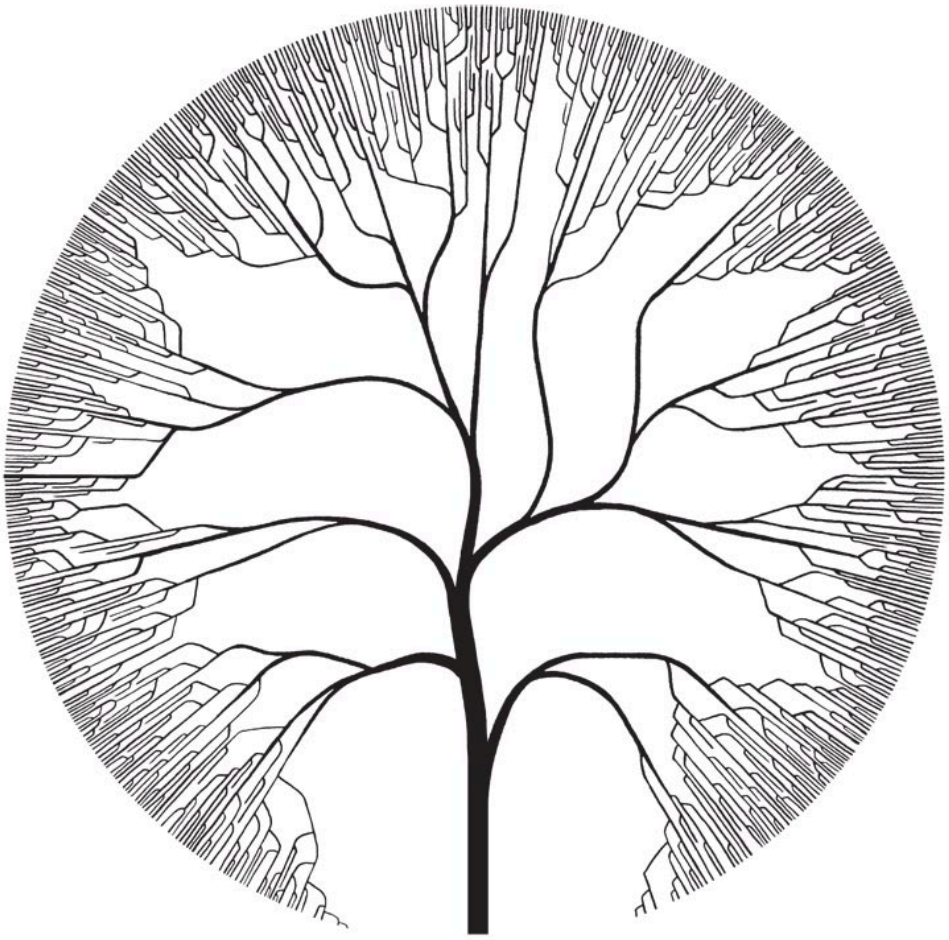
Genetyka stanowi fundament naszego życia, kształtuje nasze poczucie tożsamości i spojrzenie na świat. Na późnym etapie życia odkryłem coś ciekawego o własnych genach. Dorastałem w rodzinie robotniczej: mój ojciec pracował w fabryce, a matka była sprzątaczką. Bracia i siostry zakończyli edukację w wieku piętnastu lat; ja jako jedyny zostałem w szkole, a potem poszedłem na studia. Miałem szczęśliwe dzieciństwo; rodzice mnie wspierali, choć czynili to w dość staroświecki sposób. Byli nieco starsi od matek i ojców moich znajomych, więc czasami żartowałem, że to prawie moi dziadkowie.

Wiele lat później aplikowałem o zieloną kartę, abym mógł zamieszkać w USA i objąć posadę rektora Uniwersytetu Rockefellera w Nowym Jorku. Ku mojemu zaskoczeniu podanie zostało odrzucone. Departament Bezpieczeństwa Krajowego Stanów Zjednoczonych jako przyczynę podał fakt, że na dostarczonym przeze mnie skróconym akcie urodzenia – którym posługiwałem się całe życie – nie podano imion i nazwisk rodziców. Zirytowany zamówiłem w urzędzie pełny dokument, nie wiedząc, że czeka mnie potężny wstrząs. Okazało się, że moi rodzice wcale nimi nie byli – to rzeczywiście moi dziadkowie, a biologiczną matkę przez całe życie uważałem za starszą siostrę. Zaszła w ciążę przypadkiem, w wieku siedemnastu lat, a ponieważ w tamtych czasach uważano coś takiego za powód do wstydu, została wysłana do ciotki w Norwich, gdzie się urodziłem. Następnie wróciliśmy do Londynu, a babcia postanowiła chronić dobre imię córki i wychować mnie jako własnego syna. Cóż za ironia – specjalizuję się w genetyce, a nie miałem pojęcia o własnym

dziedzictwie! Wszyscy ludzie, którzy wiedzieli o tej sprawie, już nie żyją, więc nadal nie mam pojęcia, kim był mój biologiczny ojciec: w akcie urodzenia w miejscu jego imienia i nazwiska widnieje tylko długa kreska.

Każda jednostka rodzi się ze względnie niewielką liczbą nowych wariantów genetycznych, które najczęściej pojawiają się przypadkowo i nie pochodzą od żadnego z biologicznych rodziców. Poza tym, że czynią one różne organizmy wyjątkowymi, te możliwe do późniejszego dziedziczenia odmienności wyjaśniają też, dlaczego żaden gatunek nie jest statyczny i nie pozostaje w dokładnie takiej samej formie przez długie odcinki czasu. Życie wciąż eksperymentuje, szuka nowych rozwiązań i dostosowuje się do przeobrażeń, jakie powoduje i zastaje w świecie. Aby to było możliwe, geny muszą równoważyć konieczność wiernego przechowywania informacji z jednoczesną zdolnością do zmiany – czasami poważnej. Następny rozdział pokaże, jak to się dzieje i co sprawia, że życie na Ziemi jest tak zdumiewająco zróżnicowane.

Czas porozmawiać o ewolucji drogą doboru naturalnego.



3
Ewolucja drogą doboru naturalnego

Przypadek i konieczność

Otaczający nas świat aż kipi od niezliczonych form życia. Do powstania tej książki pośrednio doprowadził motyl latolistek cytrynek, wczesny zwiastun wiosny. Ze swymi delikatnymi żółtymi skrzydłami stanowi piękny przykład niezwykle różnorodnej grupy zwierząt nazywanych insektami.

Lubię owady, a zwłaszcza chrząszcze, którymi fascynowałem się jako nastolatek. Występują one w zdumiewającym bogactwie odmian – uważa się, że na świecie istnieje nawet ponad milion różnych gatunków należących do tego rzędu owadów. Dorastając w Anglii, zachwycałem się pancerzykami chrząszczy przemykających pod kamieniami, chrząszczami świecącymi w ciemnościach, czerwono-czarnymi biedronkami polującymi na mszyce w ogrodzie, chrząszczami wodnymi żyjącymi w stawach i ryjkowcami w paczkach mąki. Chrząszcze jawią się nam w kakofonii odmian; same w sobie stanowią cały mikrokosmos.

Życie w swoim bogactwie form czasami może przytłaczać; dzielimy planetę z niezliczonymi zastępami zwierząt, ptaków, ryb, roślin i grzybów oraz z jeszcze dłuższą listą mikrobów, z których każdy jest doskonale przystosowany do trybu życia, jaki wiedzie, i otaczającego go środowiska. Nic dziwnego, że przez tysiąclecia ludzie przypisywali tę wielość odmian i kształtów działaniom boskiego stwórcy.

Mity stworzenia świata pojawiają się w prawie wszystkich kulturach i wyznaniach. Według wersji judeochrześcijańskiej odczytanej dosłownie życie powstało w ciągu zaledwie kilku dni. Powszechne przekonanie, jakoby każdy gatunek na Ziemi został oddzielnie zaprojektowany przez Boga, doprowadziło genetyka Johna B.S. Haldane’a do żartobliwego stwierdzenia, że Bóg, kimkolwiek jest, „darzy chrząszcze przesadną sympatią”.

W XVIII i XIX wieku myśliciele zaczęli porównywać misterną budowę żywych organizmów do skomplikowanych maszyn projektowanych

i budowanych w czasie rewolucji przemysłowej. Te porównania często umacniały przekonania religijne ludzi tamtych czasów: jak to możliwe, by taka złożoność i precyzja istniały w świecie bez ingerencji nadludzkiego geniuszu?

Barwny przykład takiego rozumowania stanowiły wnioski wyciągnięte przez wielebnego Williama Paleya w 1802 roku. Paley zachęca czytelnika do wyobrażenia sobie, że podczas spaceru znalazł na ścieżce zegarek. Gdybyśmy go rozmontowali i przyjrzeli się skomplikowanemu mechanizmowi zaprojektowanemu bez wątpienia w celu odmierzania czasu, jego widok przekonałby nas, że zegarek jest dziełem inteligentnego Stwórcy. Według Paleya ta sama zasada musiała się więc odnosić do złożonych organizmów żywych istot.

Dziś wiemy, że wyrafinowane, funkcjonujące wedle ściśle określonych zasad formy życia mogą powstawać bez udziału świadomego pomysłodawcy – odpowiada za to dobór naturalny.

Właśnie ten głęboko twórczy proces doprowadził do powstania zarówno ludzi, jak i całej niesamowitej gamy innych żywych istot, które nas otaczają – od milionów różnych odmian mikrobów, przez straszliwe żuwaczki chrząszcza jelonka, trzydziestometrowe czułki meduzy festonowej, wypełnione cieczą trawienną pułapki dzbanecznika, aż po przeciwstawne kciuki człowiekowatych, wliczając w to nas samych. Ewolucja drogą doboru naturalnego doprowadziła do powstania kolejnych pokoleń coraz bardziej złożonych i różnorodnych stworzeń, nie zbaczając przy tym ani razu ze ścieżki określonej przez prawa nauki i nie uciekając się do pomocy sił nadprzyrodzonych. Eony mijały, na świecie pojawiały się kolejne gatunki, a następnie zmieniały nie do poznania, gdy odkrywały nowe możliwości rozwoju i wchodziły w interakcje z różnymi środowiskami i innymi żywymi stworzeniami. Wszystkie gatunki, łącznie z naszym własnym, są w stanie ciągłej metamorfozy prowadzącej ostatecznie do wymarcia lub przeistoczenia się w nowy gatunek.

W moich oczach taka historia powstania życia jest nie mniej fascynująca niż którykolwiek z mitów kreacjonistycznych. Większość religijnych

opowieści pokazuje nam znajome – wręcz przyziemne – akty stworzenia, zamknięte w odcinku czasu, jaki łatwo nam objąć rozumem. Ewolucja drogą doboru naturalnego zmusza nas do wyobrażenia sobie czegoś wykraczającego poza znajome rejony, ale też o wiele wspanialszego. To proces przyrostowy toczący się bez wyraźnego celu, ale w kontekście ram czasowych tak szerokich, że trudnych do pojęcia przez ludzki umysł (w nauce mówimy na to *deep time*, czyli czas głęboki), staje się najpotężniejszą ze wszystkich sił stworzenia.

Najsławniejszą postacią w historii badań ewolucji jest Karol Darwin, dziewiętnastowieczny naturalista, który udał się w podróż dookoła świata na pokładzie maleńkiego okrętu Królewskiej Marynarki Wojennej o nazwie „Beagle", by zbierać próbki różnych gatunków roślin, zwierząt i skamielin. Zafascynowany Darwin notował swoje spostrzeżenia potwierdzające ideę ewolucji i wymyślił wspaniałą teorię doboru naturalnego, wyjaśniającą działanie tego mechanizmu. Swoje odkrycia wyłożył w monografii *O powstawaniu gatunków* z 1859 roku. To prawdopodobnie najlepiej znana, choć nie zawsze najlepiej rozumiana, ze wszystkich wielkich koncepcji świata biologii.

Darwin nie był pierwszym badaczem sugerującym, że życie na Ziemi ewoluowało z biegiem czasu. We wspomnianej wyżej książce Anglik napomyka o Arystotelesie, który twierdził, że zwierzęta zyskują lub tracą różne części ciała w ciągu wielu lat. Francuski naukowiec Jean-Baptiste Lamarck, żyjący na przełomie XVIII i XIX wieku, poszedł o krok dalej – uznał bowiem, że różne gatunki są ze sobą związane łańcuchem pokrewieństwa. Francuz wysunął tezę, że stworzenia należące do jednego gatunku przeistaczają się stopniowo w procesie adaptacji, a ich forma dostosowuje się do zmian nawyków oraz otaczającego środowiska. Lamarck znany jest zwłaszcza z twierdzenia, że żyrafy wykształciły długie szyje, bo wyciągały je do góry, by dosięgnąć liści na wyższych gałęziach. To z kolei miało skutkować przekazywaniem efektów tych starań potomstwu, które z pokolenia na pokolenie rodziło się z nieco dłuższą szyją. Zasługi Lamarcka są dziś czasami umniejszane, gdyż badacz nie

wyjaśnił właściwie wszystkich szczegółów procesu ewolucji. Należy mu się jednak uznanie za stworzenie jednego z pierwszych obszernych opisów tego zjawiska, nawet jeśli nie był przy tym nieomylny.

Nie tylko Lamarck spekulował na temat mechanizmów ewolucji. Nawet w najbliższej rodzinie Karola Darwina znaleźli się podobni zapaleńcy. Jego dziadek, Erazm Darwin, był barwną postacią i kolejnym wczesnym gorliwym entuzjastą tej teorii. Kazał nawet umieścić na swoim powozie motto: *E conchis omnia* („Wszystko pochodzi z muszli”), by w ten sposób rozpowszechniać przekonanie, że całe życie na świecie pochodzi od o wiele prostszych organizmów, takich jak pozornie bezkształtne mięczaki ukryte w muszlach. Przodek Karola musiał jednak pozbyć się napisu po tym, jak dziekan katedry w Lichfield oskarżył go o „wyparcie się Stwórcy”. Erazm posłusznie usunął deklarację – był cenionym lekarzem i obawiał się, że sprzeciwiając się dziekanowi, ryzykowałby utratę co szacowniejszych (a zatem również zamożnych) pacjentów. Erazma znano także jako utalentowanego poetę, który swoje poglądy na ewolucję wyraził w poemacie *Świątynia przyrody*:

> Istoty te najmniejsze, pod szkiełkiem niewidzialne,
> Pierwsze pełzły w błocie, po wyjściu z wód gremialnem;
> A gdy pokoleń rzędy kolejno się rodziły,
>
> Zyskawszy nowe moce, kończyny wykształciły;
> Stąd wyższe formy życia, ujrzawszy ląd odległy,
> Oddechem, płetwą, stopą i skrzydłem nań wyległy.

Darwin senior nie wsławił się talentem poetyckim (może i słusznie), zapamiętano go za to jako naukowca. W strofach wiersza zdołał jednak opisać pewne aspekty idei, które później miał rozwinąć jego lepiej znany wnuk.

Karol Darwin interesował się naukowym i systematycznym podejściem do zagadnienia ewolucji, wybierał też bardziej konwencjonalne metody komunikacji niż dziadek, bo ograniczał się do prozy. Dzięki obszernym

badaniom skamielin, roślin i zwierząt w ojczyźnie i poza jej granicami zebrał ogromną ilość obserwacji. Uporządkował je wszystkie, by przedstawić solidne dowody na pogląd, który dzielił z Lamarckiem, swym dziadkiem Erazmem oraz innymi badaczami twierdzącymi, że żywe organizmy ewoluują. Kiedy jednak Darwin przedstawił dobór naturalny jako mechanizm ewolucji, zrobił coś więcej niż poprzednicy: połączył wszystkie elementy układanki i pokazał światu, jak może rzeczywiście działać ewolucja.

Podstawą idei doboru naturalnego jest fakt, że populacje żywych organizmów występują w różnych wariacjach. Kiedy powstają one w wyniku zmian genetycznych, są dziedziczone z pokolenia na pokolenie. Niektóre z takich wariacji wpływają na predyspozycje do rozmnażania obdarzonych nimi jednostek. Sukcesy w reprodukcji sprawiają, że osobniki posiadające nowe cechy będą stanowić większą część populacji w kolejnym pokoleniu. W kwestii długiej żyrafiej szyi możemy wnioskować, że przypadkowe pojawianie się i nagromadzenie wariantów genetycznych, które nieco zmieniły budowę szkieletu i mięśni szyi zwierzęcia, pomagały przodkom dzisiejszych żyraf sięgać do nieco wyższych gałęzi drzew, a zatem jeść więcej liści i przyjmować więcej składników odżywczych. Ostatecznie więc to właśnie te osobniki okazywały się odporniejsze i lepiej przystosowane do wydawania na świat młodych, więc stada żyraf wędrujących przez afrykańskie sawanny stopniowo stały się zdominowane przez zwierzęta o dłuższych szyjach. Ten proces nazywamy doborem naturalnym, bo to właśnie ograniczenia narzucane przez najróżniejsze czynniki naturalne (takie jak rywalizacja o pokarm i partnerów czy podatność na choroby lub pasożyty) sprawiają, że niektóre osobniki radzą sobie lepiej, a zatem płodzą więcej potomstwa niż inne.

Ta sama idea została, niezależnie od odkryć Darwina, zaproponowana przez naturalistę i kolekcjonera Alfreda Russela Wallace’a. Nie wszyscy wiedzą, że obaj naukowcy uważnie śledzili spekulacje z początku wieku na temat doboru naturalnego. Interesowały ich zwłaszcza przemyślenia szkockiego rolnika i właściciela ziemskiego Patricka Matthew, opisane

w opublikowanej przez niego w 1831 roku książce o budulcu okrętowym. Darwin jednak jako pierwszy przedstawił koncepcję ewolucji wyczerpująco, przekonująco i na tyle ciekawie, by jego wizja przetrwała próbę czasu.

Ludzie od tysięcy lat korzystali z zasad tego procesu, żeby z jego pomocą uzyskiwać organizmy o konkretnych cechach. Takie działanie nazywamy doborem sztucznym lub hodowlanym. Sam Darwin zresztą opracował swoją teorię doboru naturalnego poprzez obserwację, jak gołębiarze wybierają konkretne ptaki do dalszego chowu, by uzyskać szerszą gamę odmian gołębi. Dobór sztuczny może prowadzić do dramatycznych rezultatów. Właśnie za jego sprawą zmieniliśmy wilka szarego w najlepszego przyjaciela człowieka, tworząc najróżniejsze rasy psów – od maleńkiego chihuahua po wielkiego doga niemieckiego. Również w wyniku tego procesu gorczyca polna przeistoczyła się w brokuły, kapustę, kalafiora, jarmuż i kalarepę. Takie transformacje odbywały się dość szybko, w ciągu stosunkowo niewielu pokoleń, co może stanowić skromną ilustrację tego, z jakim rozmachem działa proces ewolucji, gdy może przebiegać w sposób naturalny przez miliony lat.

Dobór naturalny prowadzi do przetrwania najsilniejszych (choć, co ciekawe, sam Darwin nigdy nie użył tego zwrotu) i eliminacji osobników niepotrafiących sprostać konkurencji. To prowadzi do narastania w populacji pewnych zmian genetycznych, a zatem do trwałych modyfikacji w wyglądzie i działaniu różnych organizmów. Proces ten tłumaczy, dlaczego niektóre chrząszcze wykształciły czerwono nakrapiane pancerze, a inne nauczyły się pływać, toczyć kulki gnoju lub świecić w ciemnościach.

Teoria doboru naturalnego to przełomowa idea, której znaczenie wykracza poza granice dziedziny biologii. Pozwala ona wyjaśnić różne procesy i znajduje praktyczne zastosowanie w wielu dyscyplinach, nawet w informatyce. Na przykład współcześnie programy i niektóre elementy maszyn takich jak samoloty są optymalizowane za pomocą algorytmów

naśladujących swoim działaniem proces doboru naturalnego. Zamiast projektować je w tradycyjny sposób, poddajemy je ewolucji.

Aby doszło do ewolucji drogą doboru naturalnego, żywe organizmy muszą spełniać trzy istotne warunki.

Po pierwsze – muszą być zdolne do rozmnażania.

Po drugie – muszą być wyposażone w system dziedziczenia, pozwalający na kopiowanie i przekazywanie potomstwu informacji definiujących cechy organizmu.

Po trzecie – system dziedziczenia musi się charakteryzować zmiennością, przekazywaną potomstwu w procesie reprodukcji. Dobór naturalny odbywa się właśnie na podstawie zmienności. Dzięki temu różne cechy mogą pojawiać się stopniowo i przypadkowo, by ostatecznie doprowadzić do powstania nieskończenie zmiennej gamy form życia wokół nas.

Poza tym, aby ten proces działał skutecznie, żywe organizmy muszą umierać. W ten sposób następne pokolenia – potencjalnie wyposażone w warianty genetyczne zwiększające ich przewagę nad konkurencją – mogą zastąpić poprzedników.

Te trzy niezbędne wymogi wyłaniają się bezpośrednio z mechanizmów rządzących działaniem komórek i genów. Wszystkie komórki rozmnażają się w takim samym cyklu i są wyposażone w system dziedziczenia oparty na duplikacji genów, które są kopiowane i przekazywane w chromosomach w procesie mitozy. Wariacje powstają za sprawą pojawiania się przypadkowych mutacji zmieniających sekwencje DNA – takich jak ta, która zaprowadziła mnie do odkrycia genu *cdc2*. Biorą się one z rzadko występujących błędów w kopiowaniu podwójnej helisy albo ze środowiskowych uszkodzeń DNA. Komórki reperują te mutacje, ale nie do końca. Gdyby naprawy te były stuprocentowo skuteczne, wszystkie osobniki danego gatunku wyglądałyby identycznie i ewolucja stanęłaby w miejscu. To oznacza, że sam margines błędu również podlega prawom doboru naturalnego. Gdyby był zbyt duży, informacje przechowywane w genomach uległyby degeneracji i straciły wartość, a gdyby błędy pojawiały się zbyt rzadko, drastycznie obniżałoby to szansę powstania

zmian ewolucyjnych. W długoterminowej perspektywie największy sukces odniosą te gatunki, które zdołają zachować równowagę między trwałością a zmianą.

W złożonych organizmach eukariotycznych wariantywność pojawia się również podczas reprodukcji drogą płciową, kiedy części chromosomów zostają przetasowane podczas podziału komórek rozrodczych (plemników i komórek jajowych u zwierząt oraz pyłku i zalążków u roślin okrytonasiennych). Takie komórki powstają wskutek procesu, który nazywamy mejozą. Stanowi on główną przyczynę, dla której rodzeństwo się od siebie różni: geny rodziców są jak talia kart, z której każde dziecko otrzymuje inne rozdanie.

Wiele istot żywych wprowadza wariacje poprzez bezpośrednią wymianę sekwencji DNA między różnymi osobnikami. To zjawisko jest powszechne wśród mniej złożonych organizmów, takich jak bakterie, które mogą zamieniać się genami, ale zdarza się również u bardziej skomplikowanych stworzeń. Ten proces nazywamy poziomym transferem genów. Między innymi dlatego geny niektórych bakterii uodporniające je na antybiotyki rozpowszechniają się szybko wśród całych populacji, a nawet przechodzą z jednego gatunku na drugi, niespokrewniony z nim. Poziomy transfer genów utrudnia też prześledzenie procesu ewolucji, bo sprawia, że geny mogą „przeskakiwać” z jednej gałęzi drzewa życia na drugą.

Bez względu na swoje źródło zmiana ewolucyjna wymaga, by genetyczna wariantywność przetrwała reprodukcję i umożliwiła powstawanie organizmów różniących się od siebie w każdym możliwym wymiarze, bez względu na to, czy chodzi o subtelne różnice – takie jak odporność na choroby, atrakcyjność dla osobników płci przeciwnej, tolerancja na pokarmy – czy o cechy bardziej wyraziste. Dobór naturalny pomaga odsiać warianty przydatne od szkodliwych.

Istotną konsekwencją ewolucji drogą doboru naturalnego jest połączenie wszystkich form życia wspólnym pochodzeniem. To oznacza, że gdybyśmy prześledzili rozwój drzewa życia wstecz, zobaczylibyśmy, jak mniejsze gałęzie cofają się, wchłaniane przez większe, aż wreszcie wszystkie

schodzą się w jeden pień. Można z tego wysnuć wniosek, że my, ludzie, jesteśmy spokrewnieni z każdą inną formą życia na naszej planecie. Z niektórymi – takimi jak wielkie małpy – łączą nas bliskie więzi, ponieważ znajdujemy się na sąsiednich gałązkach na skraju korony drzewa. Z innymi zaś, na przykład z moimi drożdżami, mamy o wiele odleglejszą relację, gdyż łączy nas moment o wiele odleglejszy w czasie, bliżej pnia drzewa.

To, jak fundamentalnie są ze sobą połączone wszystkie formy życia, dotarło do mnie podczas wędrówki z przewodnikiem przez wilgotny, kipiący zielenią las deszczowy w Ugandzie, gdzie szukałem goryli górskich. W pewnym momencie natknęliśmy się na małe stado. Usiadłem naprzeciwko wspaniałego dorosłego samca, przykucniętego pod drzewem zaledwie dwa czy trzy metry ode mnie. Zacząłem się pocić, ale nie tylko przez upał i wilgoć. Jako genetyk wiedziałem, że goryl i ja dzielimy około 96 procent genów, ale ta goła liczba opowiada tylko część historii. Kiedy napotkałem inteligentne spojrzenie jego ciemnobrązowych oczu, zobaczyłem, że odbija się w nich wiele aspektów mojego człowieczeństwa. Małpy były bardzo wyczulone na siebie nawzajem i na nas, ludzi. Wiele zachowań goryli wyglądało w oczywisty sposób znajomo; na pierwszy rzut oka dawało się dostrzec empatię i ciekawość tych stworzeń. Samiec i ja przyglądaliśmy się sobie przez kilka minut. To było jak rozmowa. Następnie wyciągnął ramię, przygiął do ziemi pień młodego drzewa o średnicy jakichś pięciu centymetrów (czyżby próbował mi coś przekazać?) i wdrapał się na nie powoli, nie odrywając ode mnie przenikliwego wzroku. To dramatyczne i poruszające spotkanie uświadomiło mi dojmująco, jak blisko jesteśmy spokrewnieni z tymi wspaniałymi istotami. Nasza relacja z innymi organizmami rozciąga się jednak dalej, na inne małpy, ssaki i zwierzęta, a także – na starszych rozwidleniach wspólnego drzewa genealogicznego – łączy nas z roślinami i mikrobami. W moich oczach to jeden z najlepszych argumentów, dlaczego ludzkość powinna troszczyć się o całą biosferę, czyli wszystkie formy życia, z którymi wspólnie zamieszkujemy Ziemię.

Jeszcze bardziej niespodziewana chwila zrozumienia naszej głębokiej więzi biologicznej z innymi żywymi organizmami nastąpiła, kiedy postanowiłem przekonać się, czy komórki drożdży *S. pombe* i człowieka kontrolują swój cykl komórkowy w ten sam sposób. Zadałem sobie to pytanie w latach osiemdziesiątych, gdy objąłem posadę w instytucie badań onkologicznych w Londynie. Ponieważ nowotwory powstają wskutek aberracji zachodzącej w procesie podziału ludzkich komórek, większość moich współpracowników była, co zrozumiałe, o wiele bardziej zainteresowana mechanizmem kontroli cyklu komórkowego u człowieka niż u drożdży. Ja już wtedy wiedziałem, co odpowiada za ten mechanizm w komórkach *S. pombe*: *cdc2*, najistotniejszy gen o nieciekawej nazwie.

Zastanawiałem się, czy to możliwe, że ludzki cykl podziału komórek jest kontrolowany przez naszą wersję tego samego genu *cdc2*. Taka teoria wydawała się nieprawdopodobna, jako że drożdże i ludzie bardzo się od siebie różnią – ostatniego wspólnego przodka mieliśmy 1,2 do 1,5 miliarda lat temu. Aby nadać tak niewyobrażalnemu odcinkowi czasu jakiś punkt odniesienia, dodam, że dinozaury wyginęły „zaledwie” 65 milionów lat temu, a pierwsze proste organizmy zwierzęce pojawiły się na Ziemi 500 lub 600 milionów lat przed nami. Absurdem byłoby twierdzić, że komórki tak odległych krewnych kontrolowały swoją reprodukcję w taki sam sposób jak nasze, ale musieliśmy to sprawdzić.

Pracująca w moim laboratorium Melanie Lee postanowiła spróbować znaleźć ludzki gen działający tak samo jak *cdc2* w drożdżach *S. pombe*. W tym celu wyizolowała komórki drożdży z defektywnym genem *cdc2*, przez co nie mogły się dzielić, i „posypała” je całą biblioteką genów z tysięcy cząstek ludzkiego DNA. Każda z nich zawierała jeden ludzki gen. Melanie zapewniła warunki gwarantujące, że zmutowane komórki drożdży sięgną tylko po jeden lub dwa geny z puli. Gdyby jeden z nich okazał się ludzkim odpowiednikiem *cdc2* i gdyby funkcjonował tak samo w komórkach drożdży i człowieka, a także gdyby ludzki gen *cdc2* okazał się zdolny do transferu do komórek drożdży, to zmutowane komórki *S. pombe* mogłyby odzyskać zdolność podziału. Gdyby to wszystko

potoczyło się zgodnie z planem, drożdże zaczęłyby tworzyć kolonie, które Melanie mogłaby dostrzec na szkiełku. Pewnie już zauważyliście, że w tym planie było sporo gdybania. Czy sądziliśmy, że eksperyment się powiedzie? Raczej nie, ale warto było spróbować.

Wydarzyło się jednak coś niesamowitego – to zadziałało! Na szalce Petriego pojawiły się kolonie, a my zdołaliśmy wyizolować wycinek ludzkiego DNA, który zastąpił drożdżom gen *cdc2*, niezbędny im do podziału komórek. Kiedy przeprowadziliśmy sekwencjonowanie tego tajemniczego genu, okazało się, że jest on zbudowany z białek bardzo podobnych do tych w genie *cdc2*. Natychmiast pojęliśmy, że patrzymy na dwie bardzo do siebie zbliżone wersje tego samego genu – tak podobne, że gen należący do człowieka okazał się zdolny kontrolować podział komórkowy u drożdży.

To niespodziewane odkrycie doprowadziło nas do dalekosiężnych wniosków. Pokrewieństwo drożdży *S. pombe* i człowieka przecina się na niezwykle odległym czasowo etapie ewolucji, a więc z dużym prawdopodobieństwem można stwierdzić, że komórki każdego zwierzęcia, grzyba i rośliny na naszej planecie kontrolują swój cykl podziału w taki sam sposób. Uznaliśmy, że niemal na pewno wszystkie są zależne od działania genu bardzo podobnego do *cdc2* obecnego w komórkach drożdży. Co więcej – nawet po eonach ewolucji i rozwinięciu się prostych organizmów w niezliczone formy oraz wykształceniu przez nie różnych modeli funkcjonowania podstawy zarządzania tym fundamentalnym procesem właściwie się nie zmieniły. Gen *cdc2* to innowacja, która przetrwała w naturze ponad miliard lat.

Wykazanie, w jaki sposób komórki człowieka kontrolują swój podział, jest kluczowe dla zrozumienia, jak nasze ciała zmieniają się, gdy rośniemy, rozwijamy się, chorujemy i tracimy sprawność w ciągu życia. Odkrycie Melanie Lee umocniło mnie w przekonaniu, że mechanizmy te można z korzyścią analizować na przykładzie wielu różnych żywych organizmów, nawet tak prostych jak drożdże.

Dobór naturalny odbywa się nie tylko podczas ewolucji; dochodzi do niego nawet na poziomie życia komórek w naszym ciele. Nowotwory pojawiają się, kiedy geny potrzebne do kontroli rozwoju i podziału komórek są uszkodzone lub poprzestawiane, co powoduje ich niekontrolowane namnażanie się. Tak jak ma to miejsce w przypadku ewolucji organizmów, tak samo komórki przednowotworowe lub nowotworowe mogą – jeśli uda im się ominąć systemy bezpieczeństwa w naszym ciele – stopniowo przerosnąć populację niezmienionych komórek w danej tkance. Im bardziej namnażają się komórki uszkodzone, tym większe staje się ryzyko dalszych zmian genetycznych w ich wnętrzu, przez co uszkodzenia genetyczne się kumulują, a następne pokolenia komórek nowotworowych są bardziej agresywne od poprzednich.

Ten proces charakteryzuje się wszystkimi trzema cechami potrzebnymi do ewolucji drogą doboru naturalnego: zdolnością komórek do reprodukcji, posiadaniem przez nie systemu dziedziczenia i możliwością różnicowania materiału dziedziczonego. To paradoks, że okoliczności, które umożliwiły pojawienie się człowieka, są też odpowiedzialne za jedną z najbardziej śmiercionośnych chorób, z jakimi on się dziś zmaga. Od strony praktycznej oznacza to jednak również, że ludzie nauki zajmujący się zagadnieniami ewolucji i genetyki populacyjnej mogą nam pomóc zrozumieć, jak działa nowotwór.

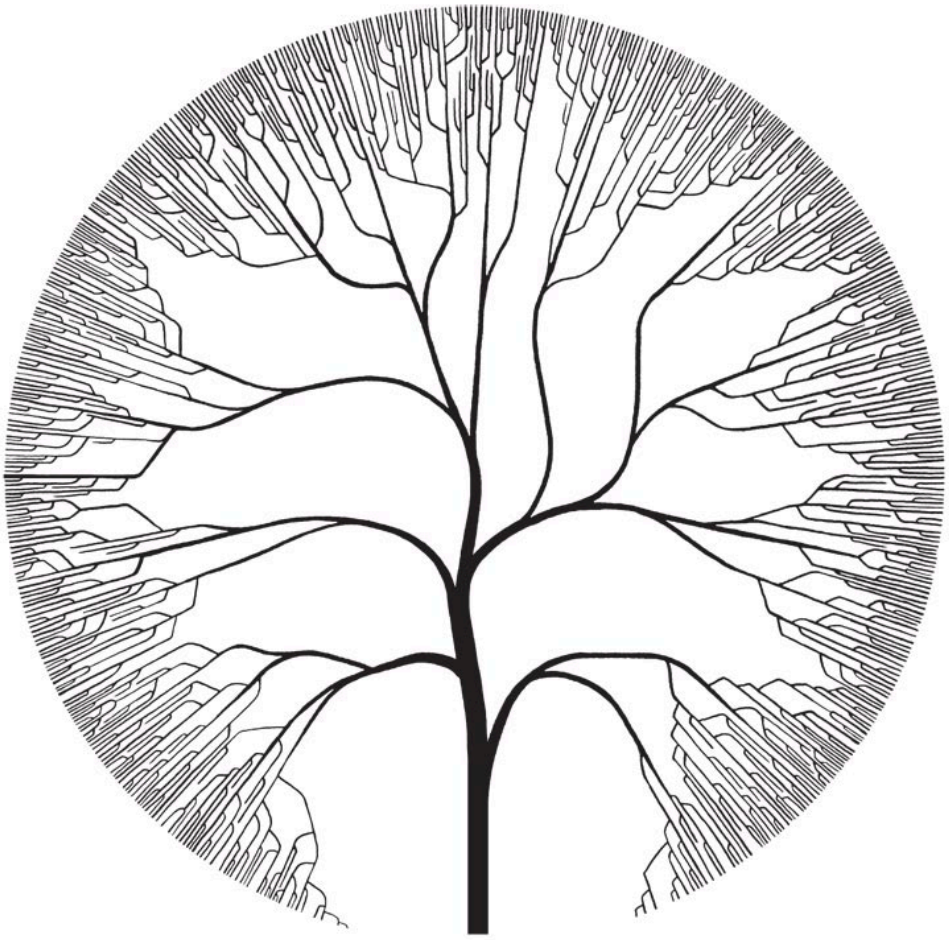
Ewolucja drogą doboru naturalnego daje żywym organizmom ogromną różnorodność i pozorny cel istnienia. Robi to bez żadnej odgórnej decyzji, inteligencji, zdefiniowanego zamierzenia czy siły napędowej. Zbija wszystkie argumenty powołujące się na boskiego Stwórcę, takie jak ukuta przez Paleya alegoria z zegarkiem znalezionym na ścieżce i wiele innych przed nią i po niej. Ja nieprzerwanie zachwycam się siłą stworzenia w jej prawdziwej postaci.

Nauka o ewolucji miała dość dramatyczny wpływ na przebieg mojej własnej życiowej ścieżki. Babcia była baptystką, więc w każdą niedzielę chodziliśmy do pobliskiego kościoła tego wyznania. Dobrze znałem (i nadal znam) Biblię, rozważałem nawet kapłaństwo albo misjonarstwo!

Później jednak, mniej więcej w tym samym czasie, kiedy zobaczyłem w ogrodzie latolistka cytrynka, pierwszy raz usłyszałem w szkole o idei doboru naturalnego. Naukowe wytłumaczenie obfitości form życia stało w wyraźnej opozycji do nauk Pisma Świętego. Usiłując jakoś zrozumieć ten rozdźwięk, poszedłem porozmawiać z duchownym w kościele baptystów. Zasugerowałem, że być może kiedy Bóg opowiada historię stworzenia, wyjaśnia nam to w sposób zrozumiały dla niewykształconych wiernych, zamieszkujących wsie i miasteczka dwa lub trzy tysiące lat temu. Dodałem, że może powinniśmy traktować to bardziej jak mit, a w rzeczywistości Bóg wykreował jeszcze wspanialszy mechanizm stworzenia, bo wymyślił przecież ewolucję i dobór naturalny. Niestety pastor nie podzielał mojej wizji. Oznajmił, że powinienem wierzyć w dosłowną prawdę Księgi Rodzaju i że będzie się za mnie modlić.

Wtedy zaczął się mój stopniowy proces odchodzenia od wiary w stronę ateizmu, a właściwie sceptycznego agnostycyzmu. Zauważyłem, że różne religie głoszą bardzo odległe teorie i nawet odłamy jednego wyznania nie zawsze się pokrywają. Nauka otworzyła przede mną drogę do bardziej racjonalnego pojmowania świata. Dała mi też większe poczucie pewności, a nawet stabilności, i wyposażyła mnie w lepsze narzędzia do poszukiwania prawdy, a właśnie to stanowi jej fundamentalne zadanie.

Ewolucja drogą doboru naturalnego wyjaśnia, w jaki sposób różne formy życia powstają i zyskują cel istnienia. Steruje nią przypadek i konieczność wydawania na świat coraz sprawniej działających istot. To jednak nie wyjaśnia, jak działają żywe organizmy. W tym celu musimy przyjrzeć się kolejnym dwóm ideom – pierwszą z nich jest życie rozumiane jako proces chemiczny.



4
Życie jako proces chemiczny

Porządek z chaosu

Większość ludzi, rozejrzawszy się po świecie, uporządkowałaby go według dwóch kategorii: tego, co żyje, i tego, co żywe zdecydowanie nie jest. Organizmy żywe wyróżniają się swoim działaniem; mają w nim cel, reagują na zmiany w otoczeniu i się reprodukują. Żadnej z tych cech nie da się przypisać czemuś nieżyjącemu, na przykład kamykowi, górze albo piaszczystej plaży. Gdybyśmy cofnęli się o kilkaset lat, do czasów poprzedzających rozwój idei opisanych w tej książce, moglibyśmy uznać, że całe życie na Ziemi napędzane jest tajemniczą siłą spływającą wyłącznie na żywe stworzenia.

Tę koncepcję nazywamy witalizmem – jej początki sięgają czasów filozofów klasycznych, takich jak Arystoteles i Galen, a prawdopodobnie jeszcze wcześniej. Nawet najracjonalniejszym naukowym umysłom z trudem przychodzi całkowite odrzucenie takiego myślenia. Każdy, kto widział czyjąś śmierć, zna tę chwilę, w której wydaje się nam, że gaśnie jakaś nieuchwytna iskra.

Atrakcyjność perspektywy witalistycznej polega na tym, że niesie pocieszenie w obliczu problemów, z którymi nasze umysły nie potrafią sobie poradzić. Dziś jednak wiemy już na pewno, że nie potrzebujemy do istnienia żadnej magii. Większość aspektów życia można wyjaśnić za pomocą fizyki i chemii, choć ta ostatnia przybiera w procesach życiowych szczególną postać – niezwykle uporządkowaną i zorganizowaną, której wyrafinowaniu nie dorównuje żaden proces nieożywiony. Według mnie takie wyjaśnienie jest jeszcze bardziej zachwycające niż przekonanie o tajemniczych nadprzyrodzonych siłach, wymykających się naukowym analizom.

Idea, że życie jest chemią, ma swoje początki – co może zaskakiwać – w badaniach nad fermentacją, czyli procesem, w którym proste mikroby drożdży wytwarzają alkohol podczas produkcji piwa lub wina. Tym zagadnieniem ludzkość interesuje się od bardzo dawna.

Moje własne życie zostało w dużej mierze ukształtowane przez fermentację, i to nie tylko dlatego, że lubię piwo, a spędzanie wieczorów w pubie na samotnej kontemplacji świata stanowi dla mnie bardzo przyjemne zajęcie. W wieku siedemnastu lat skończyłem szkołę i chciałem studiować biologię, ale nie miałem szans dostać się na uniwersytet. Za moich czasów jednym z wymogów przyjęcia na studia był zdany O-level (dawny brytyjski odpowiednik dzisiejszej matury) z języka obcego. Ja jednak sześć razy zawaliłem egzamin z francuskiego, przez co stałem się chyba narodowym rekordzistą! Dlatego też nie poszedłem na uniwersytet i zamiast tego zostałem technikiem w laboratorium mikrobiologii działającym przy browarze.

Do moich codziennych zadań należało przygotowywanie pożywek, którymi dokarmialiśmy mikroby. Szybko się połapałem, jakie posiłki podaje się drożdżom i jak często, więc zamiast robić je codziennie, mogłem przyszykować dużą porcję w poniedziałek, żeby starczyła na cały tydzień. Powiedziałem o tym szefowi, Vicowi Knivettowi (który w wolnych chwilach zajmował się tańcem gruzińskim, co odkryłem przypadkiem, kiedy pewnego wieczoru zobaczyłem, jak wykonuje energiczne kozackie wykopy na laboratoryjnym stole!). Przełożony wspaniałomyślnie zaproponował, żebym wykorzystał wolny czas do badań nad przenoszeniem się bakterii salmonelli na kurze jaja. Miałem osiemnaście lat i byłem w siódmym niebie – mogłem codziennie przeprowadzać eksperymenty jak prawdziwy naukowiec.

W tym samym roku pewien życzliwy profesor z Uniwersytetu w Birmingham zaprosił mnie na rozmowę, a następnie po długich pertraktacjach zdołał przekonać władze uczelni, by przymknęły oko na mój brak talentu do języka Moliera. Dzięki jego wstawiennictwu mogłem więc w 1967 roku zacząć studia na wydziale biologii. O ironio, trzydzieści lat później w nagrodę za zasługi w badaniu właściwości komórek drożdży prezydent Francji odznaczył mnie Orderem Narodowym Legii Honorowej. Udało mi się nawet wygłosić przemówienie po francusku! Pomimo że

większość życia pracowałem z drożdżami, nigdy nie wyprodukowałem jednak samodzielnie ani kropli wina czy piwa.

Analizę naukową procesu fermentacji zapoczątkował osiemnastowieczny francuski szlachcic i badacz Antoine Lavoisier, jeden z ojców współczesnej chemii. Niestety Lavoisier dorabiał sobie jako poborca podatków, za co zapłacił głową w 1794 roku podczas rewolucji francuskiej – niepowetowana strata nie tylko dla niego, ale i dla całego świata nauki. Sędzia trybunału ludowego, który skazał Lavoisiera na karę śmierci, oznajmił, że „republice niepotrzebni są uczeni i chemicy". To kolejny dowód na to, że naukowcy muszą uważać na polityków! Panuje wśród nich przykra tendencja – zwłaszcza w przypadku ludzi o populistycznych skłonnościach – do ignorowania opinii ekspertów, szczególnie jeśli nie pokrywają się one z ich własnymi, często niepopartymi faktami.

Przed niefortunnym spotkaniem z gilotyną Lavoisier zafascynował się procesem fermentacji. Ocenił, że fermentacja to reakcja chemiczna, podczas której cukier z soku winogronowego przekształca się w etanol obecny w winie otrzymywanym na końcu tego procesu. Nikt przed nim nie patrzył na to w taki sposób. Następnie Lavoisier poszedł jeszcze krok dalej i wysunął tezę o istnieniu substancji, którą nazwał „fermentem" – uznał, że pochodzi ona z winogron i odgrywa istotną rolę w reakcji chemicznej, ale nie potrafił określić, czym właściwie jest.

Pół wieku później zagadka się wyjaśniła. Wtedy to miejscowy wytwórca win poprosił francuskiego biologa i chemika Ludwika Pasteura o pomoc w znalezieniu przyczyny, dla której część produkowanego alkoholu się psuje. Proces fermentacji miazgi z buraków cukrowych czasami szedł nie po myśli winiarza i zamiast etanolu w kadziach pojawiał się cuchnący kwas. Pasteur zabrał się do sprawy z zacięciem godnym detektywa. Za pomocą mikroskopu wytropił najważniejszą poszlakę: osad w kadziach zawierał komórki drożdży. Na pierwszy rzut oka dało się dostrzec, że są żywe, bo niektóre wypuszczały pączki, a więc właśnie się rozmnażały. Gdy Pasteur zbadał próbki z kadzi zawierających skwaśniałe wino, nie znalazł w nich żadnych komórek drożdży. Na podstawie tej prostej obserwacji

naukowiec wysnuł wniosek, że to właśnie drożdże są tajemniczym „fermentem”, o którym pisał Lavoisier, a zatem czynnikiem odpowiedzialnym za produkcję etanolu. Inne mikroby, zapewne jakaś mniejsza od drożdży bakteria, wytwarzały natomiast kwas psujący wino w niektórych kadziach.

Najważniejszy wniosek był taki, że to rozwój żywych komórek odpowiada za konkretną reakcję chemiczną – w tym przypadku przetwarzanie glukozy w etanol. Pasteurowi udało się przejść od szczegółu do ogółu i sformułować zasadę odnoszącą się do szerszego zjawiska. Naukowiec stwierdził, że reakcje chemiczne to nie tylko ciekawostka dotycząca życia komórek, lecz jedne z najważniejszych mechanizmów sterujących życiem wszystkich istot na świecie. Pasteur znakomicie to podsumował zdaniem: „Reakcje chemiczne stanowią przejaw życia komórki”.

Teraz już wiemy, że w komórkach wszystkich żywych organizmów zachodzą setki, a nawet tysiące reakcji chemicznych równocześnie. To one tworzą molekuły życia, które z kolei budują komponenty i konstrukcje wewnątrz komórek. One też są odpowiedzialne za rozbijanie tych molekuł, by dokonywać recyklingu elementów komórki i wyzwalać energię. Te niezliczone reakcje zachodzące razem w żywych organizmach nazywamy metabolizmem. Stanowi on podstawę wszystkich mechanizmów życia: wzrostu, rozwoju i reprodukcji, z niego też bierze się cała energia potrzebna do napędzania tych procesów. Metabolizm to chemia życia.

Skąd jednak biorą się te – bardzo zróżnicowane – procesy chemiczne składające się na metabolizm? Jaki rodzaj substancji w drożdżach Pasteura odpowiadał za reakcje prowadzące do fermentacji? Inny francuski chemik, Marcellin Berthelot, jeszcze dogłębniej zbadał ten problem i zrobił dalsze postępy. Zmielił komórki drożdży, a z ich resztek wyprowadził substancję, która zachowywała się w intrygujący sposób: uruchamiała pewną szczególną reakcję chemiczną – rozbicie cukru stołowego, czyli sacharozy, na dwa mniejsze cukry, glukozę i fruktozę – ale nie zostawała w jej wyniku skonsumowana. Była nieożywioną substancją, niezbędną jednak do procesu

życiowego. Co istotne, substancja nadal pracowała po usunięciu z komórki. Berthelot nazwał ją inwertazą.

Inwertaza jest enzymem. Enzymy zaś to katalizatory: to znaczy, że ułatwiają i przyspieszają reakcje chemiczne, czasami w ogromnym stopniu. Są niezwykle potrzebne do zaistnienia życia. Bez nich wiele najważniejszych procesów w ogóle by się nie odbyło, zwłaszcza przy stosunkowo niskich temperaturach i łagodnych warunkach panujących w większości komórek. Odkrycie enzymów położyło fundament pod dzisiejsze wspólne stanowisko wszystkich biologów, że zjawiska dotyczące życia najlepiej da się odczytać w kategoriach reakcji chemicznych, katalizowanych przez enzymy. Aby zaś zrozumieć, jak enzymom udaje się to osiągnąć, musimy pojąć, czym są i z czego się składają.

Większość enzymów jest utworzona z białek budowanych przez komórkę w formie długich, przypominających łańcuch molekuł, zwanych polimerami. Struktury polimerowe mają fundamentalne znaczenie dla każdego aspektu chemii tworzącej życie. Większość enzymów to polimery, podobnie jak wszystkie inne białka, molekuły lipidowe tworzące ściany komórkowe, tłuszcze i węglowodany przechowujące energię, kwasy nukleinowe odpowiedzialne za dziedziczenie, kwas deoksyrybonukleinowy (DNA) i blisko z nim związany kwas rybonukleinowy (RNA).

Te polimery zbudowane są przede wszystkim z atomów zaledwie pięciu pierwiastków chemicznych: węgla, wodoru, tlenu, azotu i fosforu. Najważniejszą rolę w tej grupie odgrywa węgiel, głównie dlatego, że jest bardziej uniwersalny od pozostałych. Atomy wodoru na przykład tworzą tylko jedno wiązanie chemiczne z innymi atomami, natomiast atom węgla może się połączyć aż z czterema. Właśnie ta zdolność umożliwia węglowi budowanie polimerów: dwa z czterech potencjalnych wiązań węgla mogą połączyć się z innymi atomami, często również węgla, tworząc łańcuch będący podstawą konstrukcji każdego polimeru. Wciąż zostają mu dwa wolne miejsca, w których atom węgla może się związać z innymi atomami. Te dodatkowe wiązania mogą posłużyć do doczepienia innych molekuł po bokach głównego łańcucha polimerowego.

Wiele polimerów jest tak dużych, że nadano im własną nazwę: makromolekuły. Aby lepiej wyobrazić sobie ich proporcje, pomyśl, że makromolekuły DNA wewnątrz każdego z twoich chromosomów mogą osiągnąć po rozciągnięciu nawet kilka centymetrów długości. To oznacza, że łączą miliony atomów węgla w niesamowicie długą i cienką molekularną nić.

Polimery białkowe nie są aż tak długie – zazwyczaj powstają z kilkuset do kilkunastu tysięcy powiązanych ze sobą atomów węgla. Są one jednak o wiele bardziej zróżnicowane chemicznie niż DNA, i właśnie to stanowi główny powód, dla którego mogą stawać się enzymami i umożliwiać przebieg procesu metabolicznego. Każde białko jest polimerem zbudowanym na strukturze węglowej, powstającym za sprawą łączenia się mniejszych molekuł aminokwasów, jedna po drugiej, w długi łańcuch. Inwertaza na przykład jest molekułą białka zbudowaną z 512 aminokwasów połączonych w precyzyjnie uporządkowaną sekwencję.

Życie korzysta z dwudziestu różnych aminokwasów. Każdy z nich ma poboczne molekuły wyrastające z głównego łańcucha polimerowego, i to właśnie one nadają tym aminokwasom ich wyjątkowe właściwości chemiczne. Niektóre mają ładunek dodatni lub ujemny, są też takie przyciągane bądź odpychane przez wodę, a jeszcze inne umieją z łatwością tworzyć związki z innymi molekułami. Budując łańcuchy z różnych kombinacji aminokwasów, każdego z własnymi pobocznymi molekułami, komórki mogą tworzyć najróżniejsze molekuły białek polimerowych.

Po zespoleniu linearne łańcuchy polimerów białkowych skręcają się, zwijają i łączą, tworząc skomplikowane trójwymiarowe struktury. Trochę tak jak długi kawałek taśmy klejącej zlepiający się w kulkę – choć sposób składania się białek jest o wiele bardziej uregulowany i prowadzi do powstania precyzyjnie zaprojektowanej przez naturę struktury. Nić z aminokwasów ułożonych w konkretnym porządku zawsze będzie dążyć do uformowania w komórce dokładnie takiego samego kształtu. Ten przeskok z jednego do trzech wymiarów jest niezwykle ważny, gdyż oznacza, że każde białko ma swój własny fizyczny kształt i wyjątkowy

zestaw właściwości chemicznych. Wskutek tego komórki mogą budować enzymy tak, żeby pasowały one idealnie do substancji chemicznych, z którymi mają pracować – na przykład molekuły inwertazy i sacharozy perfekcyjnie się dopełniają. To zaś pozwala enzymom generować dokładnie takie warunki, jakie są potrzebne do zajścia konkretnych reakcji chemicznych.

Enzymy prowadzą do niemal wszystkich reakcji chemicznych leżących u podstaw metabolizmu komórkowego. Oprócz budowania i rozkładania molekuł pełnią one jednak również wiele innych funkcji. Zajmują się kontrolą jakości molekuł, przesyłają komunikaty z jednej części komórki do drugiej, a także transportują materiały budulcowe i molekuły wewnątrz komórki. Inne enzymy czujnie wypatrują najeźdźców z zewnątrz i aktywują białka broniące komórki – a zatem nasz organizm – przed chorobami. Enzymy nie są jedyną formą białek. Niemal każda część naszego ciała – od włosów na głowie przez kwas żołądkowy po soczewki gałek ocznych – jest zrobiona albo z białek, albo z ich pomocą. Wszystkie te najróżniejsze formy protein wyspecjalizowały się przez tysiąclecia ewolucji tak, by spełniać bardzo precyzyjnie określone funkcje w komórce. Nawet względnie prosta komórka zawiera ogromną liczbę molekuł białek. W jednej maleńkiej komórce drożdży jest ich ponad 40 milionów! To dwa razy więcej białek niż ludzi zamieszkujących Pekin!

Taka różnorodność białek wywołuje niekończące się tornado reakcji chemicznych wewnątrz każdej komórki. Gdybyśmy zdołali zajrzeć do środka żywej komórki oczami zdolnymi do obserwacji świata molekularnego, nasze zmysły zostałyby zaatakowane przez rozbuchany zgiełk setek zachodzących równocześnie procesów. Niektóre z molekuł biorących udział w reakcjach mają ładunek elektryczny, przez co stają się lepkie lub odpychające, a inne pozostają bierne i neutralne. Są też molekuły o właściwościach kwasowych lub zasadowych. Wszystkie te rozmaite substancje bez przerwy wchodzą w interakcje podczas przypadkowych kolizji lub w wyniku celowych spotkań. Czasami molekuły łączą się przejściowo, by wywołać reakcję chemiczną za sprawą szybkiej wymiany

elektronów lub protonów, a czasami tworzą mocne, ciasne wiązania i pozostają sczepione chemicznie. W każdej komórce zachodzi w sumie wiele tysięcy różnych reakcji chemicznych odpowiadających jednocześnie za podtrzymanie życia. Przy tej liczbie bledną moce przerobowe największych przemysłowych zakładów chemicznych. Fabryka wyrobów plastikowych na przykład może bazować na zaledwie kilkudziesięciu reakcjach.

Cała ta nieposkromiona kotłowanina znajduje się na przeciwnym krańcu spektrum czasu niż „głęboki czas", którego te systemy potrzebowały, by ewoluować. Oszałamiająca prędkość działania świata komórek stanowi dla naszych umysłów równie wielkie wyzwanie, co powolny proces ewolucji. Niektóre z enzymów w komórkach przeprowadzają tysiące, a nawet miliony reakcji chemicznych na sekundę. Te enzymy są nie tylko niezwykle szybkie, ale i precyzyjne. Są w stanie oddziaływać na poszczególne atomy z dokładnością i skutecznością, o jakiej nasza inżynieria chemiczna może tylko pomarzyć. No ale ewolucja szlifowała te operacje przez miliardy lat – my zaczęliśmy się tym zajmować nieco później!

Koordynacja tych wszystkich procesów to niezwykłe osiągnięcie. Ogromna liczba reakcji chemicznych przetaczających się jednocześnie przez komórkę może sprawiać wrażenie chaosu, ale rządzi nimi bardzo zaawansowany porządek. Do właściwego działania każda reakcja musi mieć zapewnione bardzo konkretne warunki. Niektóre potrzebują kwaśnego lub zasadowego środowiska, inne żądają specjalnych jonów – na przykład wapnia, magnezu, żelaza albo potasu. Są też reakcje wymagające wody lub przez nią spowalniane. Wszystkie te bardzo zróżnicowane reakcje muszą się odbywać jednocześnie i bardzo blisko siebie w ciasnym wnętrzu komórki. Coś takiego jest możliwe tylko dlatego, że poszczególne enzymy nie potrzebują do funkcjonowania ekstremalnie różnych temperatur, poziomów ciśnienia ani warunków kwasowych czy zasadowych, w przeciwieństwie do swoich kuzynów z przemysłowych zakładów chemicznych – inaczej nie byłyby w stanie funkcjonować w tak niewielkiej odległości od siebie. Wiele z reakcji metabolicznych musi jednak odbywać

się oddzielnie i nie może przeszkadzać sobie nawzajem, a przy tym potrzebuje spełnienia bardzo szczegółowych wymogów chemicznych. Rozwiązaniem tego problemu jest kompartmentacja.

Kompartmentacja to sposób na umożliwienie pracy różnym złożonym systemom jednocześnie. Weźmy na przykład miasta. Funkcjonują one sprawnie tylko wtedy, gdy wszystkie zadania są właściwie przyporządkowane: stacjom kolejowym, szkołom, szpitalom, fabrykom, komisariatom policji, elektrowniom, oczyszczalniom ścieków i tak dalej. Wszystkie te zadania muszą być wykonywane na bieżąco, żeby miasto mogło działać, ale gdyby te instytucje nie operowały osobno, cały system by się posypał. Muszą pracować blisko i w łączności ze sobą nawzajem. To samo tyczy się komórek – tworzą one w swoim wnętrzu odrębne chemiczne mikrośrodowiska, oddzielone od siebie fizycznie albo czasowo, lecz nadal ze sobą połączone. Żywym organizmom udaje się to osiągnąć poprzez konstruowanie środowisk zbudowanych ze współdziałających systemów w różnej skali – od bardzo dużych po niezwykle małe.

Największy z nich jest ci pewnie najlepiej znany: to różne tkanki i narządy organizmów wielokomórkowych, takich jak rośliny i zwierzęta, łącznie z nami, ludźmi. Stanowią one odrębne elementy, zaprojektowane w celu wykonywania konkretnych procesów chemicznych i fizycznych. Żołądek i jelita trawią związki chemiczne zawarte w pożywieniu, wątroba wyprowadza toksyny z leków, jedzenia i alkoholu, serce wykorzystuje energię chemiczną do pompowania krwi i tak dalej. Działanie tych organów zależy od wyspecjalizowanych tkanek i komórek, które je tworzą: komórki błony śluzowej żołądka wydzielają kwas, a te, z których powstają mięśnie serca, doprowadzają do skurczów. Każda z tych komórek również jest osobną całością.

Komórka to najbardziej podstawowy przykład schematu, jakim rządzi się życie. Najważniejszą rolą błony komórkowej jest odgrodzenie zawartości komórki od reszty świata. Dzięki oddzieleniu od otoczenia komórka może być wysepką własnego chemicznego i fizycznego porządku. Oczywiście

jest w stanie utrzymać ten stan tylko chwilowo: kiedy komórka przestaje funkcjonować, umiera, ustępując miejsca chaosowi.

Komórka zawiera w sobie wiele poziomów uporządkowania. Największe są zamknięte w błonie organelle, takie jak jądro komórkowe czy mitochondria. Zanim jednak dowiemy się, jak działają, musimy jeszcze bardziej powiększyć obraz i przyjrzeć się polimerom węglowym, bo wszystkie większe struktury w komórce powstają z nich i na podstawie ich właściwości.

Najmniejszą jednostką chemiczną wewnątrz komórki jest powierzchnia molekuł enzymów. Aby wyobrazić sobie, jak małe są te molekuły, spójrz na najcieńsze włoski na grzbiecie swojej dłoni. To jedna z najdelikatniejszych struktur, jakie zdołasz dostrzec gołym okiem, lecz w porównaniu z białkami enzymów są potężne. W przekroju jednego takiego włoska dałoby się ustawić około dwóch tysięcy molekuł inwertazy jedna przy drugiej.

Każda molekuła białek enzymatycznych tworzy zamkniętą przestrzeń i miejsca wiążące o konkretnych kształtach, stworzonych na miarę w skali indywidualnych atomów, by mogły połączyć się właśnie z tymi molekułami, z którymi współpracują. Te misterne struktury są o wiele za małe, by dało się je zaobserwować pod najmocniejszym nawet mikroskopem optycznym. W badaniach trzeba wnioskować o ich kształtach i właściwościach przy pomocy takich technologii jak krystalografia rentgenowska i mikroskopia krioelektronowa. Dzięki nim możemy przedłużać zasięg ludzkich zmysłów na niewyobrażalną skalę i określać pozycje oraz właściwości setek, a nawet tysięcy połączonych atomów. W ten sposób odkrywamy, jak enzymy wchodzą w interakcje z substancjami chemicznymi, a następnie zmieniają ich strukturę podczas reakcji. Te substancje nazywamy substratami. Enzymy oraz ich substraty pasują do siebie jak precyzyjnie zaprojektowane elementy maleńkiej trójwymiarowej układanki. Kiedy wszystkie składają się w całość, reakcje chemiczne są odgrodzone od reszty komórki i ułożone pod dokładnie takim kątem przy właściwych warunkach chemicznych, by enzymy mogły zabrać się za niezwykle precyzyjne operacje na poszczególnych atomach, tworząc

lub zrywając wiązania molekularne. Inwertaza na przykład przerywa jedno konkretne wiązanie między atomem tlenu a atomem węgla w środku molekuły sacharozy.

Enzymy potrafią współpracować, by zagwarantować, że produkt jednej reakcji natychmiast stanie się substratem następnej. W ten sposób możliwe jest skoordynowanie całej serii reakcji chemicznych potrzebnych do zaawansowanych procesów – takich jak budowa błon lipidowych i innych złożonych komponentów komórki z prostszych składników. Biolodzy nazywają te skomplikowane serie interakcji procesów chemicznych szlakami metabolicznymi – niektóre z nich składają się z wielu odrębnych reakcji. Przypominają one taśmy produkcyjne w fabryce; wszystkie kroki prowadzące do powstania skończonego produktu muszą zostać wykonane jeden po drugim w ściśle określonym porządku.

Enzymy mogą również współdziałać, by przeprowadzać jeszcze bardziej skomplikowane syntezy, takie jak niezwykle precyzyjny proces kopiowania DNA. Te enzymy możemy sobie wyobrazić jako molekularne maszyny, niezwykle precyzyjne i stabilne w działaniu. Niektóre z owych maszyn wykorzystują energię chemiczną do wykonywania fizycznej pracy wewnątrz komórki. Są wśród nich białka działające jak molekularne „silniki” napędzające większość ruchów samej komórki, jak też różnych ładunków i struktur w jej wnętrzu. Inne odgrywają rolę dostawców rozwożących substancje chemiczne i komponenty komórkowe tam, gdzie są potrzebne. W tym celu podróżują po torach również zrobionych z białek i przecinających całe wnętrze komórki niczym misternie rozplanowana sieć kolejowa. Wraz z rozwojem nauki udało nam się nagrać te maleńkie maszyny molekularne w akcji i zobaczyć, jak „chodzą” po przestrzeni komórki niczym mikroskopijne roboty. Te maszyny operują na zasadzie mechanizmu zapadkowego, który pozwala im poruszać się ciągle naprzód i unikać wytrącenia z kursu, gdy nastąpi przypadkowe zderzenie z innymi molekułami.

Inne odmiany maszyn molekularnych wytwarzają energię potrzebną do rozrywania chromosomów i rozpoławiania dzielących się komórek.

Maszyny te są nieskończenie małe, ale w milionach komórek mięśniowych znajdują się ich miliardy – właśnie one napędzają skrzydła żółtych motyli, by mogły przelatywać przez nasze ogrody, pozwalają naszym oczom czytać słowa na tej stronie, a gepardom osiągać niezrównaną prędkość w biegu. Połączenie maleńkich efektów pracy pojedynczych białek, pracujących w ogromnych liczbach na przestrzeni niezliczenie wielu komórek, pozwala na działania, których konsekwencje możemy oglądać wszędzie wokół nas.

Przyjmijmy teraz nieco większą skalę niż indywidualne enzymy i maszyny molekularne – grupy białek również są w stanie fizycznie sczepiać się ze sobą, by tworzyć zestawy narzędzi komórkowych odpowiedzialnych za przeprowadzanie bardziej złożonych procesów chemicznych. Do najważniejszych z takich grup należą rybosomy, w których powstają białka. Każdy rybosom jest zbudowany z kilkudziesięciu białek oraz kilku dużych molekuł RNA, bliskiego chemicznego kuzyna DNA. Rybosomy są większe od przeciętnych enzymów – na przekroju włosa dałoby się ich ustawić kilkaset, a nie kilka tysięcy – lecz nadal nie dałoby się ich zobaczyć bez mikroskopu elektronowego. Komórki, które rosną i się reprodukują, mają ogromne zapotrzebowanie na nowe białka, więc każda z nich może zawierać kilka milionów rybosomów.

Aby zbudować nową molekułę białka, rybosom musi odczytać kod konkretnego genu i przełożyć go na alfabet białek, złożony z dwudziestu liter aminokwasów. W tym celu komórka najpierw wytwarza tymczasową kopię konkretnego genu, zrobioną z RNA. Ta kopia odgrywa rolę posłańca i dlatego też nazywamy ją przekaźnikowym RNA, bo zostaje ona fizycznie przeniesiona z genów w jądrze komórkowym do rybosomu i zabiera ze sobą informacje genetyczne. Rybosom wykorzystuje przekaźnikowy RNA jako szablon do zbudowania białek i układa ciągi aminokwasów w porządku, który dyktuje gen przyniesiony przez RNA. Rybosomy tworzą odrębne, niezwykle uporządkowane mikrośrodowisko, dzięki czemu cały ten wielostopniowy i wieloenzymowy proces zachodzi szybko

i precyzyjnie: na zbudowanie przeciętnego białka, złożonego z około 300 aminokwasów, rybosom potrzebuje zaledwie minuty.

Następne na skali rozmiarów są organelle komórkowe – o wiele większe od rybosomów, choć wciąż mikroskopijne dla ludzkiego oka. Każda organella jest opakowana we własną błonę lipidową, stanowiącą kolejny niezbywalny element kompartmentacji w komórkach eukariontów. W centrum każdej takiej komórki znajduje się organella, którą nazywamy jądrem komórkowym. Pod mikroskopem jest ono zazwyczaj najlepiej widoczne. Komórki są bardzo małe – na przekroju najcieńszego z włosków na twoim ciele ustawiłyby się dwie do trzech białych krwinek – ale jądra komórkowe to przy nich okruszki. Jedno jądro zajmuje zaledwie 10 procent przestrzeni komórki białej krwinki. Nie zapominajmy jednak, że w tej maleńkiej przegródce kryje się kompletny egzemplarz całego twojego DNA, łącznie ze wszystkimi 22 tysiącami genów – po rozprostowaniu pakunek ten miałby dwa metry długości.

Wszystkie te różnorakie aktywności chemiczne podtrzymujące komórkę przy życiu wymagają bardzo wiele energii. Dziś większość form życia wokół nas czerpie ją z promieni słonecznych. Udaje im się to za sprawą innej niezbędnej do życia organelli: chloroplastu. W przeciwieństwie do jądra komórkowego występuje on tylko w komórkach roślin i glonów. Chloroplasty są miejscem, w którym zachodzi fotosynteza, czyli seria reakcji chemicznych korzystających ze światła słonecznego, by przekształcić wodę i dwutlenek węgla w cukier i tlen.

Enzymy potrzebne do fotosyntezy znajdują się w dwóch warstwach błony otaczającej chloroplast. Każda komórka źdźbła trawy w twoim parku mieści w sobie około stu takich mniej lub bardziej kulistych organelli, zawierających duże ilości białek, które nazywamy chlorofilami. To właśnie za sprawą chlorofili trawa jest zielona: absorbują one energię z niebieskich i czerwonych części spektrum światła i wykorzystują ją do zasilania procesu fotosyntezy, a fale zielone z widma światła są odbijane.

Rośliny, glony i niektóre bakterie zdolne do przeprowadzenia fotosyntezy czerpią energię z produkowanego przez siebie cukru, wykorzystując go

również jako surowiec do budowy innych molekuł, których potrzebują, by przetrwać. Rośliny wytwarzają też cukry i węglowodany, które spożywane są przez wiele innych organizmów: grzyby żywią się butwiejącym drewnem, owce skubią trawę, wieloryby pochłaniają tony fotosyntezującego planktonu w oceanach, a ludzie na wszystkich kontynentach przetwarzają rośliny na najróżniejsze rodzaje jedzenia. Węgiel, niezbędny do budowy każdej części naszego ciała, powstaje właśnie w wyniku fotosyntezy. Na początku ma on formę dwutlenku węgla, wychwytywanego z powietrza za sprawą reakcji chemicznych procesu fotosyntezy.

Chemia fotosyntezy nie tylko dostarczyła energię i surowce potrzebne do zbudowania większości życia na Ziemi, ale też odegrała istotną rolę w kształtowaniu historii naszej planety. Szacuje się, że życie pojawiło się około 3,5 miliarda lat temu, bo z tamtego okresu pochodzą najstarsze znalezione dotąd skamieliny. Były to organizmy jednokomórkowe, prawdopodobnie czerpiące energię ze źródeł geotermalnych. Na najwcześniejszym etapie życia na Ziemi nie istniała jeszcze fotosynteza, a więc brakowało też źródeł tlenu. Dlatego w atmosferze tlenu nie było prawie w ogóle, a wczesne formy ziemskiego życia nie reagowały na niego zbyt dobrze.

Tlen ma opinię pierwiastka podtrzymującego życie – i rzeczywiście tak jest. Nie zapominajmy jednak, że gaz ten jest bardzo podatny na reakcje chemiczne, które mogą uszkadzać inne substancje, łącznie z polimerami potrzebnymi do istnienia życia na Ziemi, takimi jak DNA. Kiedy mikroby w drodze ewolucji wykształciły zdolność fotosyntezy, zaczęły się rozmnażać i z biegiem tysiącleci ilość tlenu w atmosferze znacząco wzrosła. Następnie – od 2 do 2,4 miliona lat temu – doszło do zjawiska, które nazywamy katastrofą tlenową. Wszystkie istniejące wtedy organizmy były mikrobami (bakteriami lub archeonami), ale istnieje teoria, że większość z nich została zgładzona w wyniku nagromadzenia się tlenu w atmosferze. Cóż za ironia – to właśnie życie stworzyło na Ziemi warunki, które niemal doprowadziły do jego unicestwienia! Te nieliczne formy życia,

którym udało się przetrwać, ukryły się na dnie oceanów lub głęboko pod ziemią, gdzie nie były wystawione na działanie tlenu. Niektóre zaś zaadaptowały się do nowych warunków i wykształciły w drodze ewolucji procesy chemiczne potrzebne do życia w świecie bogatym w tlen.

Dziś różne organizmy – w tym ludzie – nadal ostrożnie obchodzą się z tlenem, ale są od niego całkowicie zależne, gdyż potrzebują go do wyzwalania energii ze spożywanych, wytwarzanych lub absorbowanych cukrów, tłuszczów i białek. Dochodzi do tego za sprawą procesu biochemicznego, który nazywamy oddychaniem komórkowym. Ostatnie etapy tej serii reakcji chemicznych odbywają się w mitochondriach, czyli kolejnej niezwykle istotnej organelli obecnej we wszystkich komórkach eukariotycznych.

Główną rolą mitochondrium jest wytwarzanie energii potrzebnej komórce do zasilania reakcji chemicznych tworzących życie. Właśnie dlatego komórki potrzebujące wiele energii zawierają w sobie dużo mitochondriów: aby twoje serce mogło bić, każda komórka jego mięśni musi zaprząc do pracy kilka tysięcy tych organelli. Wszystkie mitochondria w komórkach serca razem wzięte zajmują około 40 procent ich przestrzeni. Ze ściśle chemicznej perspektywy można powiedzieć, że oddychanie komórkowe odwraca reakcję leżącą u podstawy fotosyntezy. Cukier i tlen wchodzą ze sobą w reakcję, by stworzyć wodę i dwutlenek węgla, uwalniając przy tym znaczną ilość energii, którą organizm przechowuje, by wykorzystać ją później. Mitochondria są odpowiedzialne za uważną kontrolę tego wieloetapowego procesu i gwarantują, że przebiegnie on w uporządkowany sposób bez marnowania nadmiaru energii. Pilnują też, żeby reaktywny tlen i elektrony nie wymknęły się i nie uszkodziły innych części komórki.

Najistotniejszy krok w przechwytywaniu energii w procesie oddychania komórkowego jest oparty o ruch protonów – pojedynczych atomów wodoru pozbawionych elektronu, dzięki czemu mają dodatni ładunek elektryczny. Protony zostają wypchnięte ze środka mitochondrium do przestrzeni

między jego dwiema zewnętrznymi błonami. W wyniku tego działania o wiele więcej naładowanych protonów znajduje się poza wewnętrzną błoną mitochondrium niż w środku. Proces ten wywodzi się z chemii, lecz jest fizyczny z natury. Przypomina nieco pompowanie pod górę wody, aby napełnić sztuczny zalew. W hydroelektrowni woda ze zbiornika spływa następnie w dół przez turbiny przekształcające energię kinetyczną wody w energię elektryczną. W przypadku mitochondriów protony pompowane poza „tamę” błon wpadają z powrotem do centrum tej organelli kanałami utworzonymi z białek, które przechwytują energię produkowaną przez kaskadę naładowanych cząsteczek, a następnie przechowują ją pod postacią naładowanych wiązań chemicznych.

Osobą, która jako pierwsza wyobraziła sobie, że komórki mogą wytwarzać swoją energię w tak niespodziewany sposób, był brytyjski biochemik i noblista Peter Mitchell. Wykładał on na Wydziale Zoologii Uniwersytetu Edynburskiego, gdzie później pracowałem nad cyklem komórkowym drożdży, ale do tego czasu Mitchell zdążył już założyć prywatne laboratorium na mokradłach południowo-zachodniej Anglii. Była to dość niecodzienna decyzja, przez co niektórzy zaczęli go uważać za prawdziwego brytyjskiego ekscentryka. Poznałem go, kiedy dobijał już osiemdziesiątki. Zrobił na mnie wrażenie umiejętnością twórczego myślenia i niezachwianą wiarą w swoją wizję – niezłomnie dążył do udowodnienia prawdziwości swojej tezy, mimo sceptycznych opinii otoczenia.

Maleńkie struktury białkowe służące za „turbiny” w mitochondrium nawet z wyglądu przypominają nieco turbiny w elektrowniach, choć są od nich kilka miliardów razy mniejsze! Kiedy protony pędzą przez molekularną turbinę (o średnicy szerokości dziesięciu tysięcznych milimetra), uruchamiają równie mały wirnik. Gdy zaczyna się on obracać, doprowadza do wytworzenia niezwykle ważnego wiązania, w wyniku którego powstaje nowa molekuła adenozyno-5′-trifosforanu, w skrócie ATP. Wszystko to odbywa się w tempie 150 reakcji chemicznych na sekundę.

ATP stanowi uniwersalne źródło życiowej energii. Każda molekuła tej substancji przechowuje energię jak mikroskopijna bateria. Kiedy komórka potrzebuje energii na przeprowadzenie reakcji chemicznej, przerywa wysokoenergetyczne wiązanie ATP i przekształca tę molekułę w adenozyno-5’-difosforan (ADP), uwalniając tym samym energię, którą komórka może wykorzystać do zapoczątkowania reakcji chemicznej lub procesu fizycznego, takiego jak działania podejmowane przez motor molekularny.

Większość jedzenia, które spożywasz, prędzej czy później zostaje przetworzona w mitochondriach twoich komórek wykorzystujących energię chemiczną zawartą w pokarmie do produkcji kolosalnych ilości ATP. Aby napędzić wszystkie reakcje chemiczne potrzebne do utrzymania przy życiu bilionów komórek w organizmie, twoje mitochondria wytwarzają codziennie energię stanowiącą równowartość wagi twojego ciała! Zwróć uwagę na pulsowanie krwi w żyle na nadgarstku, ciepło skóry, unoszenie się i opadanie klatki piersiowej przy oddychaniu – właśnie ATP to umożliwia. Życie jest zasilane ATP.

Wszystkie żywe organizmy potrzebują stałych, niezawodnych dostaw energii i wszystkie wytwarzają ją w tym samym procesie: kontrolując przepływ protonów przez błonę mitochondrium, by wytworzyć ATP. Jeśli istnieje cokolwiek choć trochę przypominającego „iskrę życia”, jest nią ów molekularny przepływ ładunku elektrycznego przez błonę organelli. Nie ma w nim jednak nic mistycznego: to zrozumiały fizyczny proces. Bakterie osiągają ten efekt, pompując protony przez błonę zewnętrzną, a bardziej złożone komórki eukariontów wykorzystują w tym celu wyspecjalizowaną organellę: mitochondrium.

Razem wzięte, wszystkie te poziomy organizacji przestrzennej w komórce – od niewyobrażalnie małych miejsc wiążących wewnątrz poszczególnych enzymów po względnie duże jądro komórkowe zawierające w sobie chromosomy – prowadzą do nowego sposobu myślenia o komórce. Gdy przyjrzymy się pięknym i niezwykle szczegółowym zdjęciom, jakie mogą dziś robić najbardziej zaawansowane mikroskopy, naszym oczom ukaże się złożona i nieustająco zmienna sieć

zorganizowanych, połączonych ze sobą chemicznych mikrośrodowisk. Taki obraz komórki jest całe lata świetlne oddalony od postrzegania komórek jako prostych klocków Lego, z których natura buduje skomplikowane tkanki i organy roślin czy zwierząt. Każda komórka to kompletny, niezwykle wyrafinowany mechanizm.

Odkąd ponad dwieście lat temu Lavoisier zaczął zadawać pytania o działanie procesu fermentacji, biolodzy stopniowo przekonywali się, że nawet najbardziej złożone zachowania komórek i organizmów wielokomórkowych można analizować w kategoriach chemii i fizyki. Ten kierunek myślenia był niezwykle istotny dla mnie oraz mojego zespołu, z którym szukałem odpowiedzi na pytanie, co kontroluje cykl komórkowy. Kiedy wreszcie odkryliśmy gen *cdc2*, zapragnęliśmy się dowiedzieć, co ten gen właściwie robi. Jakie procesy chemiczne lub fizyczne zachodzą w białkach, które wytwarza *cdc2*?

Aby to zrozumieć, należało zrobić krok w tył od nieco zbyt abstrakcyjnego świata genetyki i zbliżyć się do bardziej konkretnej, mechanicznej rzeczywistości chemii komórkowej. To zaś oznaczało, że musimy zająć się biochemią. Ta dziedzina często przyjmuje dość redukcjonistyczną perspektywę i szczegółowo opisuje mechanizmy zachodzące na poziomie chemicznym – w przeciwieństwie do genetyki, która podchodzi do sprawy bardziej holistycznie i analizuje zachowanie żywego systemu jako całości. Genetyka i biologia komórkowa już pomogły nam udowodnić, że *cdc2* jest istotnym elementem kontrolującym cykl komórkowy, ale teraz musieliśmy zwrócić się w stronę biochemii, by wykazać, w jaki sposób białka wytwarzane przez gen *cdc2* działają od strony molekularnej. Każda z tych perspektyw oferuje innego rodzaju wytłumaczenie; kiedy oba są zgodne, można sądzić, że jest się na dobrej drodze do rozwiązania.

Białko *cdc2* okazało się enzymem, który nazywamy kinazą białkową. Zapoczątkowuje on reakcję fosforylacji, w wyniku której do pozostałych białek zostaje dodana mała molekuła fosforanu o silnym ładunku ujemnym. Aby *cdc2* mógł działać jako kinaza białkowa, musi się najpierw połączyć

z innym białkiem, cykliną, która je aktywuje. Razem *cdc2* i cyklina tworzą aktywny kompleks białkowy, nazywany kinazą cyklinozależną, w skrócie CDK. Cyklina została odkryta i nazwana przez mojego przyjaciela i współpracownika Tima Hunta, który ochrzcił ją tak dlatego, że w trakcie cyklu komórkowego jej poziom opada i się podnosi, a zmiany te są częścią mechanizmu wykorzystywanego przez komórkę do tego, by kompleks CDK został „włączony" lub „wyłączony" w odpowiednim momencie. Muszę przyznać, że „cyklina" to o wiele lepsza nazwa niż „*cdc2*"!

Aktywny kompleks CDK fosforyluje inne białka, a wtedy ujemnie naładowana molekuła fosforanu, którą do nich dodał, wpływa na ich kształt i właściwości chemiczne. To z kolei zmienia sposób ich działania. Może na przykład aktywować inne enzymy, tak jak dodanie cykliny do białka *cdc2* prowadzi do powstania aktywnego kompleksu CDK. Ponieważ kinazy białkowe takie jak CDK mogą bardzo szybko fosforylować jednocześnie wiele różnych białek, enzymy te są często używane przez komórki jako przełączniki. Właśnie tak przebiega cykl komórkowy. Procesy takie jak kopiowanie DNA w fazie S na wczesnym etapie cyklu czy rozdzielanie powielonych chromosomów w trakcie mitozy pod koniec cyklu wymagają skoordynowanego działania wielu różnych enzymów. Fosforylując duże ilości różnych białek jednocześnie, CDK może kontrolować skomplikowane procesy komórkowe. Pojęcie fosforylacji białkowej jest zatem konieczne do zrozumienia, na czym polega kontrola cyklu komórkowego.

Nie potrafię nawet opisać, jak wielką satysfakcję czerpałem z odkrywania tych wszystkich elementów układanki wyjaśniającej, jak *cdc2* kontroluje cykl komórkowy. Czułem, że przeżywam niezwykle rzadki w życiu naukowca moment olśnienia. Program badań w naszym laboratorium przeszedł długą drogę: od identyfikacji genów w komórkach drożdży (takich jak *cdc2*, odpowiedzialny za kontrolę reprodukcji komórek) przez wykazanie, że ta kontrola przebiega tak samo w organizmach wszystkich eukariontów od drożdży po ludzi, aż po rozszyfrowanie mechanizmu molekularnego, który nią steruje. To zajęło nam bardzo wiele czasu – dziesięcioro badaczy w moim laboratorium pracowało nad tym

przez około 15 lat. I jak to zwykle bywa w świecie nauki, dokonaliśmy naszych odkryć na podstawie prac wielu innych laboratoriów na całym świecie, które badały cykl komórkowy najróżniejszych żywych organizmów, od rozgwiazd i jeżowców przez muszki owocówki, żaby i myszy aż po ludzi.

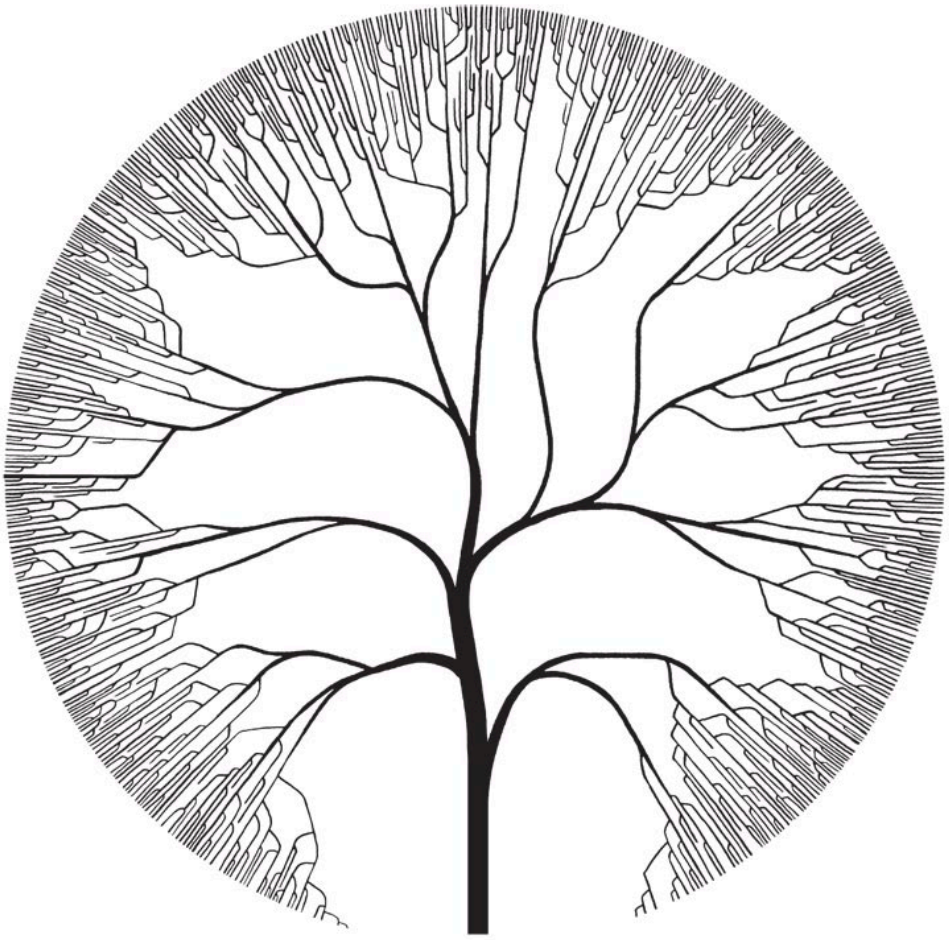
Życie wyłania się ze względnie prostych i wyjaśnionych przez naukę zasad chemicznego przyciągania i odpychania, a także budowania i zrywania wiązań molekularnych. Te podstawowe procesy operują masowo na mikroskopijną molekularną skalę i wspólnie tworzą pływające bakterie, porosty żyjące na skałach, kwiaty w naszych ogrodach, trzepoczące nad nimi motyle, a także mnie i ciebie, bym ja mógł pisać te słowa, a ty je czytać.

Przekonanie, że komórki – a zatem wszystkie żywe organizmy – to niezwykle skomplikowane, choć ostatecznie możliwe do zrozumienia chemiczne i fizyczne urządzenia, jest obecnie powszechnie akceptowanym sposobem myślenia o życiu. Ludzie nauki czerpią z tego odkrycia i usiłują scharakteryzować i skatalogować wszystkie komponenty niewyobrażalnie złożonych żywych maszyn, jakimi wszyscy jesteśmy. Pomagają nam w tym zaawansowane technologie pozwalające na prowadzenie precyzyjnych badań niesamowitej złożoności żywych komórek. Dziś możemy łatwo wyodrębnić pojedynczą komórkę lub ich grupę, sekwencjonować wszystkie zawarte w nich molekuły DNA i RNA oraz zidentyfikować i policzyć tysiące różnych rodzajów obecnych w nich białek. Potrafimy też szczegółowo opisać wszystkie tłuszcze, cukry i inne molekuły wewnątrz komórki. Technologia w ogromnym stopniu przedłuża zasięg naszych zmysłów, oferując nam nowy, niezwykle wszechstronny ogląd niewidzialnych i nieustannie się zmieniających komponentów komórki.

Otwarcie tych nowych perspektyw na istotę komórki tworzy też nowe wyzwania. Jak powiedział Sydney Brenner, „toniemy w danych, lecz wciąż brak nam wiedzy”. Brenner obawiał się, że zbyt wielu biologów poświęca zbyt wiele czasu na notowanie i opisywanie szczegółów procesów chemicznych zachodzących w żywych organizmach, nie zawsze do końca

rozumiejąc, co te dane oznaczają. Aby przekuć je na użyteczną wiedzę, musimy zrozumieć, jak żywe organizmy przetwarzają informacje.

Tę piątą wielką ideę biologii omówimy w następnym rozdziale.



5
Życie jako proces przetwarzania informacji

Wspólne działanie

Co sprowadziło do mojego ogrodu żółtego motylka? Czy był głodny, czy szukał miejsca na złożenie jajeczek, a może uciekał przed ptakiem? Albo po prostu podjął tę decyzję za sprawą jakiejś wrodzonej potrzeby odkrywania świata? Oczywiście nie wiem, co nim kierowało, ale mogę stwierdzić, że wchodził w interakcję z otoczeniem, a następnie podejmował odpowiednie działania. W tym celu zaś musiał przetwarzać dostępne mu informacje.

To właśnie informacje stanowią podstawę istnienia motyla oraz każdej innej formy życia. Wszystkie organizmy muszą nieustannie gromadzić i wykorzystywać dostępne im dane o ich własnym stanie i otaczającym je środowisku. Tylko w ten sposób mogą funkcjonować w formie złożonych, zorganizowanych systemów. Czasami coś w którymś z tych dwóch światów – zewnętrznym lub wewnętrznym – ulega zmianie. Organizm musi zidentyfikować te zmiany i ustosunkować się do nich. W przeciwnym razie nie pożyje długo.

Jak to się odnosi do motyla? Kiedy latał nad ogrodem, jego zmysły konstruowały złożony obraz. Oczy wykrywały światło, czułki pobierały próbki molekuł różnych substancji chemicznych w pobliżu, a włoski pomagały wychwytywać wibracje w powietrzu. W ten sposób motyl zbierał dużo informacji na temat miejsca, w którym się znajdowaliśmy. Następnie połączył te różnorodne bodźce w całość, by przemienić je w przydatną wiedzę, którą mógł się następnie kierować przy podejmowaniu decyzji. Mogła ona dotyczyć zaobserwowanego cienia ptaka lub ciekawskiego dziecka albo zapachu nektaru pobliskiego kwiatu. To zaś wywołało konkretny skutek: zapoczątkowało uporządkowaną sekwencję trzepotu skrzydeł, dzięki czemu motyl zdołał uniknąć ptasiej napaści lub przycupnąć na płatkach kwiatu, żeby spożyć porcję nektaru. Insekt łączył dane pozyskane z wielu źródeł i na ich podstawie podejmował decyzje brzemienne w skutki dla swojej przyszłości.

Żywe stworzenia nie tylko polegają na gromadzonych informacjach, ale też działają świadomie. Informacje zbierane przez motyla coś znaczyły. Wykorzystał je, by stwierdzić, co powinien zrobić, by osiągnąć jakiś konkretny rezultat. Właśnie to mam na myśli, mówiąc, że działał celowo.

Biologia to gałąź nauki, w której często mówimy o celowości działania. W naukach z obszaru fizyki się tego nie robi – nie pytamy o cel działania rzeki, komety czy fali grawitacyjnej. Możemy jednak poruszać to zagadnienie przy omawianiu lotu motyla albo procesów kierujących genem *cdc2*. Wszystkie żywe organizmy zajmują się sobą, dokonują samoorganizacji, rosną i się reprodukują. To celowe zachowania, opracowane ewolucyjnie, dlatego że zwiększają szanse organizmu na zrealizowanie najważniejszego celu, jakim jest podtrzymanie własnego istnienia i wydanie na świat potomstwa.

Celowe działanie stanowi jeden z definiujących aspektów życia, ale jest podejmowane tylko wtedy, kiedy organizm operuje jako całość. Jedną z pierwszych osób, które pojęły mechanizm tej szczególnej cechy istot żywych, był osiemnastowieczny filozof Immanuel Kant. W swoim ostatnim dziele, zatytułowanym *Krytyka władzy sądzenia*, Kant twierdzi, że elementy żywego organizmu istnieją ze względu na całość jego istoty, a ona z kolei istnieje, by podtrzymywać przy życiu części, z których się składa. Myśliciel uważał, że żywe organizmy to zorganizowane, spójne i samoregulujące się byty kontrolujące własny los.

Przyjrzyjmy się temu na poziomie komórki. Zachodzi w niej niezliczenie wiele reakcji chemicznych i działań fizycznych. Gdyby te procesy odbywały się chaotycznie lub były sobie przeciwne, całość szybko by się rozpadła. Tylko dzięki odpowiedniemu zarządzaniu informacjami komórka może narzucić tym niezwykle skomplikowanym mechanizmom odgórny porządek, tym samym realizując swój nadrzędny cel: przetrwanie i reprodukcję.

Aby zrozumieć, jak to działa, musimy pamiętać, że komórka to chemiczno-fizyczna machina funkcjonująca jako całość. Wiele na temat komórek można wywnioskować, badając ich komponenty, ale do

prawidłowego funkcjonowania konieczne jest, by podczas najrozmaitszych reakcji chemicznych wewnątrz żywej komórki komunikowały się one ze sobą i działały spójnie. W ten sposób, gdy coś wydarza się w jej otoczeniu lub w niej samej – na przykład w komórce jest za mało cukru albo miała ona kontakt z trującą substancją – wyczuwa zmianę i dostosowuje do niej swoje działanie, tym samym podtrzymując funkcjonowanie całego systemu na możliwie najlepszym poziomie. Tak jak motyl zbierający informacje o świecie i wykorzystujący tę wiedzę do zmiany swojego zachowania komórki też nieustannie oceniają okoliczności fizyczne i chemiczne w sobie i wokół siebie, by regulować przeprowadzane procesy.

To, jak komórka wykorzystuje dostępne jej informacje do samoregulacji, można wyjaśnić na przykładzie zbudowanych przez ludzi prostszych maszyn. Weźmy odśrodkowy regulator obrotów – wynaleziony przez holenderskiego uczonego Christiaana Huygensa do wspomagania pracy kamienia młyńskiego. W 1788 roku urządzenie zostało zaadaptowane przez szkockiego inżyniera i naukowca Jamesa Watta do innych celów. Zamontował je w silniku parowym, by utrzymywało jego pracę na stałym poziomie, tak by nie przyspieszał zanadto – w przeciwnym razie mogłoby się to skończyć wypadkiem. Regulator składa się z dwóch metalowych kul obracających się wokół centralnej osi, napędzanej przez silnik parowy. Kiedy silnik się rozpędza, siły odśrodkowe wypychają kule na zewnątrz i unoszą je do góry. To zaś otwiera zawór, który uwalnia parę z tłoka i spowalnia pracę silnika. Wtedy kule opadają, klapa zaworu się zamyka, a silnik znów może przyspieszyć, aż osiągnie pożądaną prędkość.

Działanie regulatora Watta najłatwiej wyjaśnić na podstawie procesu przetwarzania danych. Pozycja kul dostarcza urządzeniu informacji o prędkości silnika. Jeśli przekracza ona pożądany poziom, uruchamia się mechanizm otwierający zawór uwalniający parę, co pozwala regulować prędkość. Regulator jest zatem urządzeniem przetwarzającym informacje o prędkości silnika parowego. Maszyna korzysta z niego w celu samoregulacji, bez udziału ludzkiego operatora. Watt zbudował prostą mechaniczną konstrukcję zachowującą się w sposób celowy. Jej zadaniem

było utrzymywanie stałego tempa pracy silnika – i warto dodać, że znakomicie je spełniała.

Systemy działające w zasadniczo podobny sposób – choć zazwyczaj z użyciem o wiele bardziej skomplikowanych i elastycznych mechanizmów – występują powszechnie w komórkach organizmów żywych. Umożliwiają one jak najefektywniejsze osiąganie homeostazy, czyli aktywnie wytwarzanych warunków potrzebnych organizmowi do przetrwania. To za sprawą homeostazy twoje ciało utrzymuje stałą temperaturę, właściwy poziom płynów czy cukru we krwi.

Przetwarzanie informacji dotyczy wszystkich aspektów życia. Aby to zilustrować, przyjrzyjmy się dwóm przykładom skomplikowanych komponentów komórki i zachodzącym w niej procesom.

Pierwszy z nich to DNA i sposób, w jaki jego struktura molekularna umożliwia dziedziczenie. Najważniejszym aspektem istoty DNA jest to, że każdy gen stanowi linearną sekwencję informacji, zapisaną w czteroliterowym języku DNA. Sekwencje linearne to sprawdzona i bardzo skuteczna strategia przechowywania oraz przekazywania informacji. Dzięki niej możesz czytać tę książkę – jest ona stworzona właśnie z ciągów wyrazów i zdań ułożonych w precyzyjnym porządku. Z tej metody korzystali też programiści i programistki, którzy zaprojektowali kod komputera na twoim biurku i telefonu, który masz w kieszeni.

Wszystkie te kody przechowują informacje w sposób cyfrowy. Oznacza to, że dane są kodowane za pomocą różnych kombinacji niewielkiej puli znaków. Język angielski składa się z 26 symboli, czyli liter alfabetu; komputery i smartfony operują na podstawie ciągów zer i jedynek; formuła kodu DNA opiera się zaś na kombinacjach czterech zasad nukleinowych. Wielką zaletą kodów cyfrowych jest to, że łatwo można je przekładać z jednego systemu na inny. Właśnie to robią komórki, gdy tłumaczą kod DNA na RNA, a następnie na struktury białek. W ten sposób zmieniają informacje genetyczne w działania fizyczne. Osiągają to w sposób tak płynny i elastyczny, że nie dorównuje im jak dotąd żaden system komputerowy. Podczas gdy komputery muszą „zapisywać” informacje na

innym fizycznym medium, by je przechowywać, molekuły DNA po prostu są informacją, przez co stanowią wydajniejszy wariant przechowywania danych. Technologia już to podchwyciła i ludzie pracują teraz nad sposobami kodowania informacji w molekułach DNA, by przechowywać je w sposób możliwie najstabilniejszy i przy maksymalnej oszczędności miejsca.

Inną bardzo ważną cechą DNA jest zdolność bardzo precyzyjnej replikacji, co również bezpośrednio wynika z jego struktury molekularnej. Z perspektywy informacyjnej oznacza to, że przyciąganie molekularne między parami zasad (A do T, G do C) umożliwia tworzenie dokładnych i stabilnych kopii informacji przechowywanych w molekule DNA. Ta wbudowana zdolność replikowania struktury DNA wyjaśnia, dlaczego zawarte w niej informacje są tak stabilne. Niektóre sekwencje genów przetrwały nieprzerwane serie podziałów komórek przez niesamowicie długie odcinki czasu. Duże fragmenty kodu genetycznego, potrzebne do budowy różnych komponentów komórki – takie jak na przykład rybosomy – zachowały taki sam rozpoznawalny kształt we wszystkich organizmach, od bakterii i archeonów przez grzyby i rośliny aż po zwierzęta. To oznacza, że podstawowe informacje zawarte w ich genach przetrwały prawdopodobnie trzy miliardy lat.

To tłumaczy, dlaczego struktura podwójnej helisy DNA jest taka ważna. Za sprawą jej odkrycia Crick i Watson stworzyli pomost łączący dwie koncepcje: genetyczną teorię „z góry na dół”, czyli przekazywania informacji potrzebnych do zaistnienia życia z pokolenia na pokolenie, z teorią „od dołu do góry”, a więc z mechanistycznym rozumieniem budowy i sposobu działania komórki w skali molekularnej. To pokazuje, dlaczego chemia życia ma uzasadnienie tylko wtedy, gdy przyglądamy się jej z perspektywy przekazywania informacji.

Drugim przykładem ilustrującym fundamentalne znaczenie procesu przetwarzania informacji w rozumieniu istoty życia jest regulacja genów. To zestaw reakcji chemicznych wykorzystywanych przez komórkę, by „włączać” i „wyłączać” geny. Ta zdolność umożliwia jej wykorzystywanie

tylko niektórych wycinków z całej puli informacji genetycznej – tych, których akurat potrzebuje. Najlepiej zrozumiemy, jak ważna jest ta umiejętność, gdy prześledzimy proces formowania się w pełni rozwiniętego człowieka z bezkształtnego zarodka. Wszystkie komórki w twoich nerkach, skórze i mózgu zawierają ten sam komplet dwudziestu dwóch tysięcy genów, ale ich regulacja oznacza, że geny potrzebne do stworzenia nerek zostały „uruchomione” w embrionalnych komórkach nerek, a te odpowiedzialne za kształtowanie skóry czy mózgu były w tych komórkach „wyłączone”. Komórki w każdym z twoich organów różnią się od siebie, dlatego że korzystają z zupełnie innych kombinacji dostępnych im genów. Uważa się, że zaledwie cztery tysiące – czyli jedna piąta wszystkich twoich genów – są włączone i używane przez różne komórki w ciele, by umożliwiać im wykonywanie podstawowych operacji potrzebnych do przetrwania. Pozostałe są wykorzystywane sporadycznie – albo przydają się tylko konkretnym komórkom do ściśle określonych funkcji, albo mają zastosowanie jedynie w szczególnych sytuacjach.

Regulacja genów oznacza też, że dokładnie taki sam ich zestaw może posłużyć naturze do wykreowania drastycznie różnych organizmów na różnych etapach życia jednego stworzenia. Każdy latolistek cytrynek o skomplikowanej, misternej budowie zaczynał jako mniej spektakularna zielona gąsienica. Metamorfoza z jednej formy w drugą dochodzi do skutku za sprawą wykorzystania innych fragmentów informacji zawartych w tym samym genomie, a następnie zastosowania ich na różne sposoby. Regulacja genów ma jednak znaczenie nie tylko wtedy, gdy organizm rośnie i się rozwija. To także jeden z głównych sposobów komórek na dostosowanie swojego działania i budowy do zmieniającego się otoczenia tak, by przetrwać. Na przykład jeśli bakteria napotka nowe źródło cukru, szybko uruchomi geny potrzebne do jego strawienia. Innymi słowy, bakteria jest wyposażona w samoregulujący system, który automatycznie wykorzystuje dokładnie te informacje genetyczne, których potrzebuje, by zwiększyć swoje szanse na przetrwanie i reprodukcję.

Biochemia zidentyfikowała wiele ważnych mechanizmów używanych przez organizmy żywe do regulacji genów. Wśród nich są działania białek zwanych represorami, które wyłączają geny, oraz aktywatorów, odpowiedzialnych za ich uruchamianie. Udaje im się to osiągnąć poprzez znalezienie konkretnych sekwencji DNA w pobliżu regulowanego genu i przywiązanie się do nich, co zmniejsza (w przypadku represorów) lub zwiększa (gdy działają aktywatory) szanse na wytworzenie się przekaźnikowego RNA i wysłanie go do rybosomu, by powstało nowe białko.

Ważne jest pojęcie, jak to wszystko działa na poziomie chemicznym, ale poza tym, jak dochodzi do regulacji genów; chcemy się też dowiedzieć, które z nich są regulowane, czy zostają włączone czy wyłączone i dlaczego. Znalezienie odpowiedzi na te pytania może nas wprowadzić na nowy poziom rozumienia całego procesu. Dzięki temu być może odkryjemy, jak informacje przechowywane w genomie niewyróżniającej się szczególnie ludzkiej komórki jajowej pomagają uformować setki różnych innych komórek składających się na dziecko; jak nowy lek na serce może włączać i wyłączać różne geny, by poprawić funkcjonowanie komórek mięśnia sercowego; jak można przeprogramować geny bakterii, by stworzyć nowy antybiotyk. Możliwościom nie ma końca. Gdy przyglądamy się zagadnieniu regulacji genów z szerszej perspektywy, okazuje się, że procesy przetwarzania informacji stanowią podstawę działania życia.

Ta odważna nowa perspektywa wyłoniła się z badań prowadzonych przez Jacques’a Monoda i jego kolegę François Jacoba; w 1965 roku naukowcy ci otrzymali za swoją pracę Nagrodę Nobla. Wiedzieli, że badane przez nich bakterie *E. coli* mogą żyć na dwóch rodzajach cukru. Bakterie potrzebują jednak różnych enzymów do ich przyswojenia, a każdy z tych enzymów powstaje za sprawą innych genów. Monod i Jacob zadali sobie pytanie: jak bakterie dostosowują się do konsumpcji raz jednego, a raz drugiego typu cukru?

Naukowcy zaprojektowali serię błyskotliwych eksperymentów genetycznych, za pomocą których zdołali poznać logikę sterującą tym

konkretnym przykładem procesu regulacji genów. Wykazali, że kiedy bakterie karmią się jednym cukrem, białko represor wyłącza najważniejszy gen potrzebny do spożywania drugiego. Gdy jednak pojawia się możliwość spożycia drugiego cukru, bakterie natychmiast z powrotem uruchamiają wyciszony wcześniej gen odpowiadający za trawienie tego cukru. Katalizatorem tego przełączenia jest sam cukier: przywiązuje się do represora, uniemożliwiając mu prawidłowe działanie, dzięki czemu tłumiony przez niego gen z powrotem się uruchamia. To bardzo ekonomiczny i precyzyjny sposób na wywołanie celowego zachowania w komórce. Ewolucja wyposażyła bakterie *E. coli* w zdolność rozpoznawania obecności alternatywnego źródła energii i umożliwiła im wykorzystywanie informacji tak, by dostosowywały swoje wewnętrzne środowisko chemiczne do sytuacji.

Największe wrażenie robi fakt, że Jacob i Monod wpadli na to wszystko w czasach, kiedy nikt nie był w stanie wyizolować konkretnych genów i białek biorących udział w tym procesie. Naukowcy rozwiązali tę zagadkę, przyglądając się bakteriom przez filtr informacji – to znaczy, że nie musieli wiedzieć wszystkiego o komponentach komórki oraz reakcjach chemicznych zachodzących w zjawisku, które badali. Wystarczyło zastosować podejście oparte o genetykę, zmutować odpowiednie geny i traktować je jak abstrakcyjne składowe informacji odpowiedzialnych za kontrolowanie ekspresji genów.

Jacob napisał książkę zatytułowaną *Historia i dziedziczność*, a Monod – *Przypadek i konieczność*. W obu dziełach badacze analizowali problemy podobne do tych, które omawiam w tej książce, i obaj mieli na mnie ogromny wpływ. Nigdy nie poznałem Monoda, ale miałem okazję kilkukrotnie rozmawiać z Jacobem. Przy naszym ostatnim spotkaniu zaprosił mnie na lunch w Paryżu. Chciał porozmawiać o swoim życiu i podzielić się przemyśleniami o tym, jak powinniśmy definiować życie, jakie są filozoficzne implikacje ewolucji i czym różnią się dokonania francuskich i anglosaskich ludzi nauki w historii biologii. Wiecznie niespokojny, niemogący usiedzieć na miejscu przez stare rany wojenne

Jacob był wcieleniem typowego francuskiego intelektualisty – niesamowicie oczytany, o filozoficznej postawie, z ogromną wiedzą na temat literatury i polityki. To było wspaniałe, niezapomniane spotkanie.

Jacob i Monod pracowali w czasach, kiedy zaczynano rozumieć, jak informacje przepływają z sekwencji genów do białek, wpływając na funkcjonowanie komórki, oraz na czym polega zarządzanie tym procesem. Takie podejście, skupione na przetwarzaniu informacji, stanowiło również fundament mojego myślenia. Gdy zaczynałem karierę naukową, chciałem wiedzieć, jak komórka interpretuje swój własny stan i porządkuje swoje wewnętrzne procesy chemiczne tak, by kontrolować cykl komórkowy. Nie zależało mi jedynie na opisaniu, co się dzieje podczas cyklu komórkowego; musiałem pojąć, co go kontroluje. To zaś oznaczało, że często myślałem o cyklu komórkowym z perspektywy przetwarzania informacji i zwracałem uwagę na to, że komórka nie jest jedynie chemiczną machiną, lecz także logiczną, zdolną do prowadzenia własnych obliczeń strukturą. Tak właśnie postrzegali komórki Jacob i Monod. Widzieli w nich byt, który zawdzięcza swoje istnienie oraz przyszłość właśnie zdolności przetwarzania danych i zarządzania nimi.

Po dekadach ciężkiej pracy udało nam się opracować potężne narzędzia do identyfikacji oraz liczenia różnych komponentów żywych komórek. Na przykład moje własne laboratorium poświęciło dużo pracy na sekwencjonowanie całego genomu drożdży *S. pombe*. Udało się nam to osiągnąć z pomocą Barta Barrella, który pracował z Fredem Sangerem, pomysłodawcą pierwszego praktycznego i stabilnego sposobu na sekwencjonowanie DNA, opracowanego jeszcze w latach siedemdziesiątych. Spotkałem się z Fredem kilka razy podczas prac nad swoim projektem, choć zdążył on już wtedy oficjalnie przejść na emeryturę. Był dość cichym, łagodnym człowiekiem, lubiącym hodować róże. Podobnie jak wiele innych zasłużonych osób ze świata nauki, które poznałem w ciągu wielu lat praktyki, Fred również zawsze szczodrze dzielił się swoim czasem i chętnie rozmawiał z młodszymi badaczami i badaczkami, zachęcając ich do dalszych poszukiwań. Kiedy Fred

odwiedzał laboratorium Barta, wyglądał jak starszy ogrodnik, który się zgubił. To dopiero ogrodnik – z dwiema Nagrodami Nobla!

Wspólnie z Bartem zmobilizowaliśmy kilkanaście laboratoriów w całej Europie do wspólnej pracy – odczytania 14 milionów liter DNA w genomie drożdży *S. pombe*. Około 100 osób zajmowało się tym przez trzy lata i jeśli dobrze pamiętam, był to trzeci organizm eukariotyczny w historii, którego sekwencja genomu została określona precyzyjnie i w całości. Miało to miejsce około 2000 roku. Dziś kilka osób mogłoby dokonać tego samego w zaledwie jeden dzień! Takie postępy zrobiliśmy w sekwencjonowaniu DNA przez ostatnie dwie dekady.

Zbieranie takich danych jest ważne, ale to dopiero pierwszy krok w stronę najistotniejszego i o wiele trudniejszego zadania: odkrycia, jak to wszystko działa razem. W kontekście tego celu uważam, że największy postęp dokona się za sprawą obserwacji komórki jako całości złożonej z indywidualnych modułów współpracujących ze sobą tak, by wykonywać bardziej zaawansowane zadania. Słowa „moduł” używam tu do opisania całego zestawu komponentów działających razem, by realizować konkretne funkcje związane z przetwarzaniem informacji.

Zgodnie z tą definicją regulator Watta jest „modułem” o wyraźnie zdefiniowanym celu, jakim jest kontrola prędkości osiąganej przez silnik. Odkryty przez Jacoba i Monoda system regulacji genów kontrolujących przyswajanie cukru przez bakterie *E. coli* również jest modułem. Od strony przetwarzania informacji działają one w podobny sposób: stanowią przykłady modułów przetwarzania informacji, które nazywamy negatywnym sprzężeniem zwrotnym. Taki moduł może służyć utrzymywaniu stabilnych warunków w organizmie i często występuje w biologii. Właśnie takie systemy utrzymują poziom cukru w naszych organizmach na względnie stałym poziomie, nawet kiedy zjemy coś bardzo słodkiego, na przykład pączka oblanego czekoladą. Komórki w trzustce wykrywają wtedy nadmiar cukru we krwi i reagują wyzwalaniem do krwiobiegu hormonu, który nazywamy insuliną. Ona zaś aktywizuje komórki w wątrobie, mięśniach i tkankach tłuszczowych, by wchłonęły

nadmiar cukru z krwi, tym samym obniżając jego stężenie. Następnie przetwarzają go w nierozpuszczalny glikogen lub w tłuszcz, którego zapas przechowywany jest w organizmie.

Innym rodzajem modułu jest pozytywne sprzężenie zwrotne tworzące nieodwracalne przełączenia, które raz uruchomione nie dają się już nigdy dezaktywować. Pozytywne sprzężenie zwrotne kontroluje na przykład rozwój jabłek. Dojrzewający owoc wytwarza gaz nazywany etylenem, który przyspiesza dojrzewanie, co z kolei zwiększa produkcję gazu. W rezultacie jabłko nigdy nie stanie się mniej dojrzałe, a jabłka otoczone innymi pomagają sobie nawzajem szybciej dojrzewać.

Kiedy różne moduły zostają połączone w jedną całość, może dochodzić do bardziej wyrafinowanych rezultatów. Na przykład istnieją mechanizmy tworzące przełączniki zdolne do naprzemiennego aktywowania się i dezaktywowania, a także oscylatory, które rytmicznie i stale pulsują między trybem włączonym i wyłączonym. Ludziom udało się zidentyfikować różne oscylatory działające na poziomie aktywności genów i białek – są one wykorzystywane do wielu celów, na przykład do odróżniania dnia od nocy. Rośliny mają w liściach komórki używające oscylującej sieci genów i białek do mierzenia upływu czasu, dzięki czemu roślina może przewidzieć, kiedy zacznie się nowy dzień, i odpowiednio wcześnie uruchomić geny potrzebne do fotosyntezy, zanim jeszcze zrobi się jasno. Inne oscylatory pulsują wskutek komunikacji między komórkami. Dobrym przykładem jest serce bijące w twojej piersi. A także – oscylujący obieg neuronów w rdzeniu kręgowym, powtarzalnie aktywujący precyzyjne rytmy napinania i rozluźniania mięśni nóg, dzięki czemu możesz chodzić w stałym tempie. A wszystko to odbywa się bez potrzeby udziału świadomości.

Jeśli zastanawiasz się, jak moduły biologiczne współpracują, by wykształcać bardziej skomplikowane sposoby działania, pomyśl o osobie projektującej urządzenie elektroniczne, takie jak smartfon. Każda z wielu funkcji w telefonie – wykonywanie połączeń, dostęp do internetu, robienie zdjęć, puszczanie muzyki, wysyłanie wiadomości i tak dalej – może zostać

uznana za oddzielny moduł. Największym wyzwaniem dla inżyniera lub inżynierki jest upewnienie się, że wszystkie te moduły współpracują ze sobą, by telefon mógł robić wszystko, co trzeba. W tym celu należy stworzyć logiczną mapę pokazującą, jak informacje przepływają między różnymi modułami. Wielką zaletą tworzenia nowego telefonu na poziomie modułów jest to, że można się upewnić, czy jego plany są funkcjonalnie spójne, nie gubiąc się przy tym w poszczególnych elementach. W ten sposób nie muszą pilnować niezliczonych tranzystorów, kondensatorów, rezystorów i innych elektronicznych elementów, z których zbudowany jest każdy moduł.

Takie podejście ułatwia też zrozumienie mechanizmu działania komórek. Jeśli pojmiemy, że w komórce znajdują się różne moduły połączone ze sobą, by wspólnie zarządzać informacjami, to nie musimy znać wszystkich najdrobniejszych szczegółów działania każdego z modułów. Naszym priorytetem powinno być uchwycenie sensu działania tego systemu, a nie katalogowanie wszystkich jego elementów. Równie dobrze mógłbym stworzyć listę wszystkich słów występujących w tej książce wraz z informacją o tym, jak często się w niej pojawiają. Taka lista byłaby niczym zbiór części bez instrukcji. Dałaby nam jakieś pojęcie o złożoności tekstu, ale niemal całe jego znaczenie by przepadło. Aby uchwycić znaczenie, trzeba przeczytać wszystkie słowa we właściwym porządku i zrozumieć znaczenie przekazywane na wyższych poziomach: zdań, akapitów i rozdziałów. Wtedy mogą opowiedzieć nam jakąś historię, zdać sprawozdanie, połączyć różne idee i wyjaśnić skomplikowane pojęcia. Dokładnie tak samo wygląda proces katalogowania genów, białek i lipidów w komórce. To istotny punkt wyjścia, ale w rzeczywistości zależy nam na zrozumieniu, jak te części współpracują, by tworzyć moduły, które utrzymają komórkę przy życiu i umożliwią jej reprodukcję.

Analogie czerpane ze świata elektroniki i komputerów, takie jak przykład ze smartfonem, który przytoczyłem przed chwilą, przydają się do lepszego zrozumienia działania komórek i organizmów żywych, ale musimy korzystać z nich ostrożnie. Moduły przetwarzające informacje w istotach

żywych i w urządzeniach elektronicznych zaprojektowanych przez człowieka pod niektórymi względami bardzo się od siebie różnią. Sprzęt komputerowy jest statyczny i nieelastyczny – nie bez powodu mówi się na to *hardware*. Za to „oprzyrządowanie” komórek i organizmów jest płynne i dynamiczne, bo bazuje na substancjach biochemicznych, które mogą przenikać wodę w komórkach, przemieszczać się między różnymi przegrodami wewnątrz komórki, a także między jedną komórką a drugą. Składniki komórki mogą się przełączać, przestawiać i przekwalifikowywać o wiele swobodniej niż części komputera, tym samym „przeprogramowując” cały system. Wkrótce nasze przydatne dotąd metafory przestaną być pomocne, dlatego kierując się analogią do komputerowych nazw *hardware* (oznaczającego środowisko „twarde”, czyli sprzętowe) i *software* (środowisko „miękkie” – programowe), biolog Dennis Bray wymyślił termin *wetware* (środowisko „mokre”) na określenie elastycznego systemu operacyjnego komórek. Tworzą one połączenia między swoimi różnymi elementami za pomocą „mokrej” biochemii.

Ta zasada sprawdza się też w przypadku mózgu, najważniejszego zaawansowanego komputera biologicznego. W ciągu twojego życia komórki nerwowe rosną, kurczą się, tworzą i zrywają połączenia z innymi komórkami nerwowymi.

Aby jakikolwiek złożony system działał celowo jako jedna całość, potrzebna jest skuteczna komunikacja między różnymi jego elementami oraz z otaczającym go środowiskiem. Zespoły modułów odpowiedzialne za tę komunikację nazywamy w biologii szlakami sygnałowymi. Hormony wyzwalane do krwi – takie jak insulina regulująca poziom cukru we krwi – to jeden z przykładów szlaku sygnałowego. Szlaki te przenoszą informacje wewnątrz komórek, między nimi, a także między organami, całymi organizmami, populacjami organizmów, a nawet różnymi gatunkami w całych ekosystemach.

Sposób, w jaki szlaki sygnałowe przekazują informacje, może być zmodyfikowany tak, by uzyskiwać wiele różnych rezultatów. Mogą wysyłać sygnały, które po prostu włączają reakcję lub ją wyłączają, ale

mogą działać też w o wiele subtelniejszy sposób. Na przykład słaby sygnał uruchamia jedną reakcję, a silniejszy – drugą. Podobnie szept przyciąga uwagę osoby stojącej obok, ale jeśli trzeba nagle ewakuować wszystkich z miejsca zagrożenia, należy krzyczeć. Komórki mogą również wykorzystywać dynamiczne zachowania szlaków sygnałowych, by przekazywać o wiele bogatsze zbiory danych. Nawet jeśli sam sygnał odpowiada tylko za doprowadzenie do jakiegoś działania lub jego zatrzymanie, możliwe jest przesyłanie bardziej skomplikowanych informacji w zależności od tego, ile czasu trwa każdy z tych stanów. Dobrą analogią będzie tu alfabet Morse'a. Poprzez różnice w czasie trwania i porządku pulsowania sygnałów, kropki i kreski kodu Morse'a mogą przesyłać strumienie informacji pełne znaczenia – od wezwania s.o.s. po rozprawę Darwina *O powstawianiu gatunków*. Dzięki temu biologiczne szlaki sygnałowe mogą tworzyć pełne danych komunikaty oznaczające o wiele więcej niż proste „tak" lub „nie" czy komendy „włącz" i „wyłącz".

Poza przesyłaniem sygnałów w przestrzeni komórki potrzebują też sposobów na sygnalizowanie różnych komunikatów w czasie. W tym celu systemy biologiczne muszą być zdolne do przechowywania informacji. To zaś oznacza, że komórki mogą zawierać w sobie chemiczne ślady wcześniejszych doświadczeń – możemy to uznać za coś podobnego do wspomnień w mózgu. Te komórkowe wspomnienia potrafią bardzo się od siebie różnić: od przelotnych wrażeń czegoś, co wydarzyło się przed chwilą, po niezwykle długotrwałe i niezatarte wspomnienia przechowywane w DNA. Komórka wykorzystuje dane krótkotrwałe podczas cyklu komórkowego, gdy status wydarzeń z wczesnych etapów cyklu zostaje „zapamiętany" i wykorzystany do przeprowadzenia działań późniejszych. Na przykład jeśli proces kopiowania DNA jeszcze się nie zakończył albo coś w nim poszło nie tak, komórka musi zarejestrować ten fakt i zakomunikować go mechanizmom uruchamiającym proces podziału komórkowego. W przeciwnym razie mogłaby zacząć się dzielić przed prawidłowym skopiowaniem całego genomu, co doprowadziłoby do utraty informacji genetycznej i śmierci komórki.

Procesy zachodzące podczas regulacji genów pozwalają komórkom przechowywać informacje przez dłuższy czas. Zjawisko to było przedmiotem zainteresowania brytyjskiego biologa Conrada Waddingtona w połowie XX wieku. Poznałem Waddingtona na Uniwersytecie Edynburskim, gdy w 1974 roku zaczynałem pracę postdoktorską. Waddington robił wrażenie swoją wszechstronnością – interesował się sztuką i poezją, a także lewą stroną sceny politycznej, ale został zapamiętany przede wszystkim jako twórca terminu „epigenetyka". Korzystał z niego, by opisywać sposób, w jaki komórki stopniowo przejmują coraz bardziej wyspecjalizowane role w procesie rozwoju zarodka. Kiedy rosnący embrion nakazuje komórkom zabrać się za nowe zadania, zapamiętują one tę informację i rzadko zbaczają z wyznaczonej ścieżki. Dlatego komórka raz oddelegowana do budowania nerki już na zawsze pozostaje jej częścią.

W dzisiejszych czasach terminu „epigenetyka" najczęściej używa się zgodnie z intencją Waddingtona. Jest to opis zbioru reakcji chemicznych wykorzystywanych przez komórki do tego, by trwale włączać geny lub je wyłączać. Te procesy nie zmieniają sekwencji DNA w genach, tylko najczęściej dodają chemiczne „etykietki" do DNA lub do białek, które z kolei przywiązują się do DNA. To zaś tworzy wzory aktywności genów, które mogą przetrwać życie komórki, a czasami nawet wiele jej podziałów. Czasami – choć to o wiele mniej powszechne zjawisko – przechodzą nawet z jednego pokolenia na drugie, co umożliwia im przechowywanie informacji o historii życia i doświadczeniach danego organizmu i przekazywanie ich bezpośrednio, w formie chemicznej, z rodziców na potomstwo i kolejne pokolenia. Niektórzy twierdzą, że międzypokoleniowa trwałość tych schematów w ekspresji genów podważa przekonanie, że dziedziczenie opiera się wyłącznie na sekwencjach DNA zakodowanych w genach. Dostępne na chwilę obecną dowody wskazują jednak na to, że międzypokoleniowe dziedziczenie epigenetyczne zachodzi tylko w nielicznych przypadkach i jest bardzo rzadkie u ludzi i innych ssaków.

Poza regulacją genów przetwarzanie informacji jest też ważne dla tego, w jaki sposób żywe organizmy tworzą uporządkowane struktury w przestrzeni. Weźmy na przykład mojego latolistka cytrynka. To niezwykle misternie skonstruowany organizm: ma skrzydła ukształtowane tak, by pozwalały mu latać; znajdują się na nich precyzyjnie rozmieszczone plamki i żyłki. Ponadto wszystkie motyle są zbudowane według tego samego schematu: mają głowę, tułów i odwłok, sześć odnóży, parę czułków. Te struktury formują się i rosną w takich samych, przewidywalnych proporcjach. Jak dochodzi do powstania tak niesamowitej struktury? Jak coś takiego wyłania się z jednej komórki jajowej?

Nawet komórki mogą przybierać najróżniejsze, bardzo wyrafinowane kształty i formy, nieprzypominające równiutkich, wyglądających jak pudełka komórek, jakie Robert Hooke zaobserwował w plasterku korka, a ja w korzonkach cebuli pod szkolnym mikroskopem. Komórki płuc na przykład mają włoski przypominające zęby grzebienia – ich nieustanne pulsowanie usuwa z płuc śluz i infekcje; pudełkowate komórki budują kości i żyją w nich; długie, rozgałęziające się nitki neuronów sięgają do wszystkich zakątków ciała – a to tylko kilka przykładów spośród niezliczenie wielu. We wszystkich tych komórkach precyzyjnie rozmieszczone organelle mogą rosnąć i zmieniać swoją pozycję w zależności od przekształcania się komórki.

Pytanie o rozwój całego tego porządku przestrzennego stanowi jedno z największych wyzwań, przed jakimi stoi biologia. Przekonujące odpowiedzi zależą od naszego rozumienia, jak komórki sygnalizują sobie informacje w czasie i przestrzeni. Obecnie rozumiemy tylko strukturę obiektów biologicznych, które stanowią bezpośrednie zlepki molekuł. Dobrym przykładem tego jest rybosom. Kształt tych maleńkich obiektów jest definiowany przez wiązania chemiczne powstające między ich komponentami molekularnymi. Te struktury wyglądają tak, jakby zostały zbudowane poprzez dodawanie kolejnych elementów do trójwymiarowej układanki – jak budowle z klocków Lego. To oznacza, że informacje potrzebne do ich złożenia zawierają się w kształcie komponentów

rybosomu – białkach i RNA. Te kształty zaś są bardzo precyzyjnie zdeterminowane przez informacje przechowywane wewnątrz genów.

Nieco trudniej pojąć, jak rozwijają się większe struktury, takie jak organelle, komórki, organy i całe organizmy. Bezpośrednie interakcje molekuł między komponentami komórki nie wyjaśniają jeszcze, jak dochodzi do ich ukształtowania, między innymi dlatego, że są większe – czasami znacznie – niż proste struktury, takie jak rybosomy. Inną przyczyną jest to, że doskonale ukształtowane struktury różnych rozmiarów powstają i utrzymują swoją formę nawet wtedy, gdy komórki lub organizmy rosną bądź się kurczą. Coś takiego nie byłoby możliwe przy trwale zaprogramowanych interakcjach molekularnych, przypominających budowanie z klocków Lego. Weźmy na przykład podział komórki. Komórka ma bardzo uporządkowaną strukturę, a kiedy dochodzi do jej podziału, powstają dwie komórki o wielkości około połowy komórki pierwotnej, mimo to każda z nich ma taką samą strukturę co pierwotna komórka matka.

Podobne zjawisko można zaobserwować w procesie rozwoju zarodka jeżowca morskiego. Zapłodniona komórka jajowa jeżowca dokonuje kolejnych podziałów, aż w końcu powstaje złożony i piękny mały organizm. Gdyby dwie komórki uformowane po pierwszym podziale się rozdzieliły, każda z nich stworzyłaby dwa doskonale rozwinięte jeżowce, lecz co niesamowite, każdy z nich byłby o połowę mniejszy niż zwykły jeżowiec w tym samym wieku. Samoregulacja rozmiarów i kształtów organizmów żywych od ponad wieku pozostaje dla nauk biologicznych tajemnicą.

Przyglądając się procesowi przetwarzania informacji, zaczynamy jednak rozumieć, jak dochodzi do takich zjawisk jak to opisane powyżej. Jednym ze sposobów, w jaki rozwijające się zarodki wytwarzają informacje, których potrzebują, by przeistoczyć standardową komórkę lub grupę komórek w zaawansowaną strukturę, jest tworzenie gradientów chemicznych. Jeśli wpuścimy kroplę atramentu do miski z wodą, zobaczymy, jak atrament powoli się rozpływa, oddalając się od miejsca, w którym pierwotnie

znajdowała się kropla. Im dalej od kropli, tym bledszy kolor smug atramentu – tak powstaje gradient chemiczny. Może on być wykorzystywany jako źródło informacji: na przykład jeśli koncentracja molekuł atramentu jest wysoka, wiemy, że znajdujemy się blisko miejsca, gdzie wpadła kropla.

Teraz zamieńmy miskę na grupę identycznych komórek, a zamiast atramentu umieśćmy po jej jednej stronie porcję białek, które mogą zmieniać właściwości komórek. To umożliwia nam dodanie do tych komórek informacji przestrzennej, by mogły zacząć tworzyć nowy wzór. Białko rozproszy się po komórkach, tworząc gradient – z jednej strony grupy będzie występować w wysokim natężeniu, z przeciwnej w niskim. Jeśli komórki zareagują inaczej na wysokie i niskie natężenie białka, gradient proteinowy dostarczy informacji potrzebnych, by zacząć tworzyć złożony zarodek. Na przykład jeśli wysokie skupienie białek tworzy komórki głowy, średnie – tułowia, a niskie – odwłoka, to jeden prosty gradient proteinowy mógłby zasadniczo doprowadzić do powstania nowego motyla latolistka cytrynka. W rzeczywistości rzadko kiedy jest to tak proste, ale mamy dowody na to, że gradienty molekuł sygnalizujących w ciałach rozwijających się organizmów rzeczywiście prowadzą do powstawania złożonych form biologicznych.

Właśnie tymi zagadnieniami na początku lat pięćdziesiątych XX wieku zaczął się zajmować Alan Turing, jeden z twórców współczesnej informatyki, znany przede wszystkim jako człowiek, który złamał kod Enigmy. Turing zaproponował alternatywną twórczą teorię na temat tego, jak zarodki od środka generują informacje o swoich przyszłych formach. Stworzył zestaw równań matematycznych, które przewidywały zachowania substancji chemicznych wchodzących ze sobą w interakcje i tym samym przechodzących konkretne reakcje chemiczne, gdy przenikały większą strukturę biologiczną. Niespodziewanie okazało się, że jego równania (które nazwał układami reakcji–dyfuzji) mogą układać substancje chemiczne w misterne, a przy tym piękne wzory przestrzenne. Po zmianie parametrów równań dwie substancje mogą ułożyć się na przykład w równo

rozmieszczone kropki, paski lub kleksy. W modelu Turinga najbardziej atrakcyjne jest to, że owe wzory pojawiają się spontanicznie, w zależności od stosunkowo prostych zasad chemicznej interakcji między substancjami. Innymi słowy – równania Turinga ilustrują schemat umożliwiający rozwijającej się komórce lub organizmowi tworzenie informacji potrzebnych do przybrania konkretnego kształtu, a cały proces bierze się z wnętrza komórek; dzieje się tak za sprawą samoorganizacji komórki. Turing zmarł, zanim jego teorie zostały przetestowane na prawdziwych zarodkach, ale przedstawiciele biologii rozwoju uważają dziś, że właśnie to może być mechanizm odpowiadający za pojawianie się plamek na grzbiecie geparda czy pasków na ciałach ryb; właśnie on rozmieszcza mieszki włosowe na twojej głowie, a nawet rozszczepia dłonie rozwijającego się płodu dziecka na pięć odrębnych palców.

Kiedy analizujemy życie z perspektywy przetwarzania informacji, musimy pamiętać, że systemy biologiczne ewoluowały w ciągu wielu milionów lat. Już się przekonaliśmy, że innowacyjne zmiany pojawiają się w konsekwencji przypadkowych mutacji i wariacji genetycznych. Zostały one następnie odsiane przez dobór naturalny i przyswojone na stałe przez organizmy, które przetrwały i najlepiej sobie poradziły. To oznacza, że istniejące systemy i układy wciąż się zmieniają poprzez stopniowe gromadzenie nowych „dodatków”. Znów możemy tu sięgnąć po przykład telefonu lub komputera, które często wymagają pobierania i instalowania uaktualnień systemu. Urządzenia zyskują nowe funkcje, a oprogramowanie sterujące nimi też staje się stopniowo coraz bardziej złożone. Podobnie jest z organizmami żywymi – wszystkie te genetyczne „uaktualnienia” sprawiają, że cały system działania komórki z czasem staje się bardziej skomplikowany. To zaś może prowadzić do powstawania elementów zbędnych: niektóre komponenty komórki będą mieć takie same funkcje; inne okażą się pozostałościami po częściach, których organizm już nie ma; jeszcze inne staną się zupełnie niepotrzebne do codziennego funkcjonowania, ale będą przydatne, jeśli główny komponent się zepsuje.

Wszystko to oznacza, że systemy operujące żywymi organizmami bywają nierzadko mniej wydajne i racjonalnie zbudowane niż obwody sterowania zaprojektowane w sposób inteligentny przez ludzi. To kolejny powód, dla którego analogii między biologią a informatyką nie da się zaprowadzić zbyt daleko. Sydney Brenner zauważył, że „matematyka to sztuka doskonałości. Fizyka to sztuka optymalnych rozwiązań. Biologia zaś za sprawą ewolucji okazuje się sztuką rozwiązań dostatecznie dobrych". Formy życia, które przetrwały, istnieją do dziś po prostu dlatego, że działają – a nie dlatego, że wykonują różne czynności w sposób najprostszy bądź najwydajniejszy z możliwych. Cała ta złożoność i zbyteczność różnych rozwiązań sprawia, że analiza biologicznych sieci sygnalizacyjnych i przepływu informacji jest bardzo trudna. Nierzadko okazuje się, że brzytwa Ockhama (czyli zasada szukania możliwie najprostszego wyjaśnienia każdego zjawiska) po prostu nie ma zastosowania w naszej dziedzinie. To przeszkadza niektórym fizykom i fizyczkom zaczynającym przygodę z biologią. Osoby zajmujące się na co dzień fizyką zazwyczaj lubią eleganckie, proste rozwiązania, więc chaotyczna, daleka od ideału rzeczywistość istot żywych okazuje się dla nich nieprzyjemną odmianą.

W moim laboratorium często zastanawialiśmy się nad złożonością i zbytecznością różnych rozwiązań doprowadzonych do takiej, a nie innej formy w wyniku doboru naturalnego. Potrafią one przysłaniać fundamentalne zasady działania procesów biologicznych. Aby to lepiej zrozumieć, postanowiliśmy genetycznie zaprojektować komórki drożdży, chcąc stworzyć znacznie uproszczony obwód kontroli cyklu komórkowego. Przypominało to odczepianie od samochodu wszystkich elementów, które nie są niezbędne do działania pojazdu. Należało więc usunąć karoserię, światła i fotele, pozostawiając tylko najistotniejsze części: silnik, skrzynię biegów, koła. To podziałało lepiej, niż się spodziewałem. Nasze uproszczone komórki nadal były w stanie przeprowadzać główne procesy kontroli cyklu komórkowego. Ogołocenie tego złożonego mechanizmu i pozostawienie tylko najprostszych elementów sprawiło, że mogliśmy łatwiej analizować przepływ informacji. To zaś umożliwiło nam

poczynienie nowych odkryć w kwestii systemu kontroli cyklu komórkowego.

Wśród niezbywalnych regulatorów cyklu komórkowego pozostawionych na potrzeby tego eksperymentu znalazł się gen *cdc2*. Kiedy komórka drożdży przechodzi cykl komórkowy, stopniowo rośnie, co skutkuje zwiększeniem liczby kinaz cyklinozależnych (CDK) zawierających *cdc2* i cyklinę. Liczba aktywnych białek CDK we wnętrzu komórki stanowi dla niej informację o jej rozmiarze oraz najważniejszy sygnał do uruchomienia cyklu komórkowego. Białka potrzebne na wczesnym etapie cyklu komórkowego są fosforylowane przez kompleks CDK już na samym początku cyklu, co prowadzi do kopiowania DNA w fazie S, a białka potrzebne później są fosforylowane na późniejszym etapie cyklu, wywołując proces mitozy i podziału komórki na końcu cyklu komórkowego. „Wczesne" białka są bardziej wrażliwe na aktywność enzymu CDK niż „późne", są więc fosforylowane, gdy w komórce zachodzi mniejsza aktywność CDK.

Ten prosty model kontroli cyklu komórkowego rozpoznaje aktywność CDK jako fundamentalną oś koordynacji zdarzeń w samym centrum kontroli cyklu komórkowego. Wcześniej tego nie zauważaliśmy, bo przeszkadzały nam powierzchowna złożoność całego systemu komórki, nieistotne zadania wykonywane przez różne jej komponenty, obecność mniej ważnych mechanizmów kontroli, a być może także skłonność ludzkiego umysłu do dążenia w stronę złożoności zamiast wybierania prostoty.

Przez dużą część tego rozdziału koncentrowałem się na komórkach, bo stanowią one podstawową jednostkę życia, lecz teoria przedstawiająca życie jako sposób przetwarzania informacji nie odnosi się wyłącznie do komórek. Przedstawiciele wszystkich gałęzi biologii mogą spojrzeć na wiele zagadnień z zupełnie nowej perspektywy, jeśli zaczną szukać sposobu na zrozumienie, jak interakcje molekularne oraz działalność enzymów i mechanizmów fizycznych wytwarzają, transmitują, odbierają, przechowują i przetwarzają informacje. Ponieważ ta perspektywa staje się coraz powszechniejsza, można się spodziewać, że biologia odejdzie od

zdroworozsądkowego znajomego świata idei, w których mości się od dekad, i zamiast tego ruszy ku światu bardziej abstrakcyjnych wizji. To mogłoby nam pomóc w dokonaniu wielkich przełomów podobnych tym, jakie zaszły w fizyce, która przeszła od dość przyziemnych wizji Isaaca Newtona do opartego o teorię względności wszechświata Alberta Einsteina i kwantowych „dziwactw" Wernera Heisenberga i Erwina Schrödingera w pierwszej połowie XX wieku. Być może złożoność biologii doprowadzi nas do zaskakujących, nieintuicyjnych rozwiązań i zmusi biologów do analizowania ich z większą pomocą innych rejonów nauki – matematyki, informatyki czy fizyki, a nawet filozofii, w której częściej korzysta się z myślenia abstrakcyjnego, niż analizuje codzienne doświadczenia.

Kiedy uznamy, że życie opiera się na przetwarzaniu informacji, łatwiej nam będzie zrozumieć wyższe poziomy organizacji biologicznej. Ta perspektywa rzuca więcej światła na to, jak komórki komunikują się ze sobą, by tworzyć tkanki, jak tkanki tworzą organy, a organy współpracują przy budowaniu w pełni funkcjonalnego żywego organizmu, takiego jak człowiek. Te same zasady kierują zjawiskami na jeszcze większą skalę, gdy przyjrzymy się, jak istoty żywe wchodzą w interakcje ze sobą nawzajem (zarówno w ramach swojego gatunku, jak i między jednym gatunkiem a drugim) oraz jak działają ekosystemy i biosfera. Fakt, że zarządzanie informacjami odbywa się na każdą możliwą skalę – od molekuł po biosferę planety – ma ogromne konsekwencje dla tego, w jaki sposób interpretujemy procesy rządzące życiem. Często okazuje się, że najlepiej szukać wyjaśnień bliskich poziomowi zjawiska, które się analizuje. Nie zawsze musimy redukować odpowiedź do molekularnej skali genów i protein, by odpowiedź była zadowalająca.

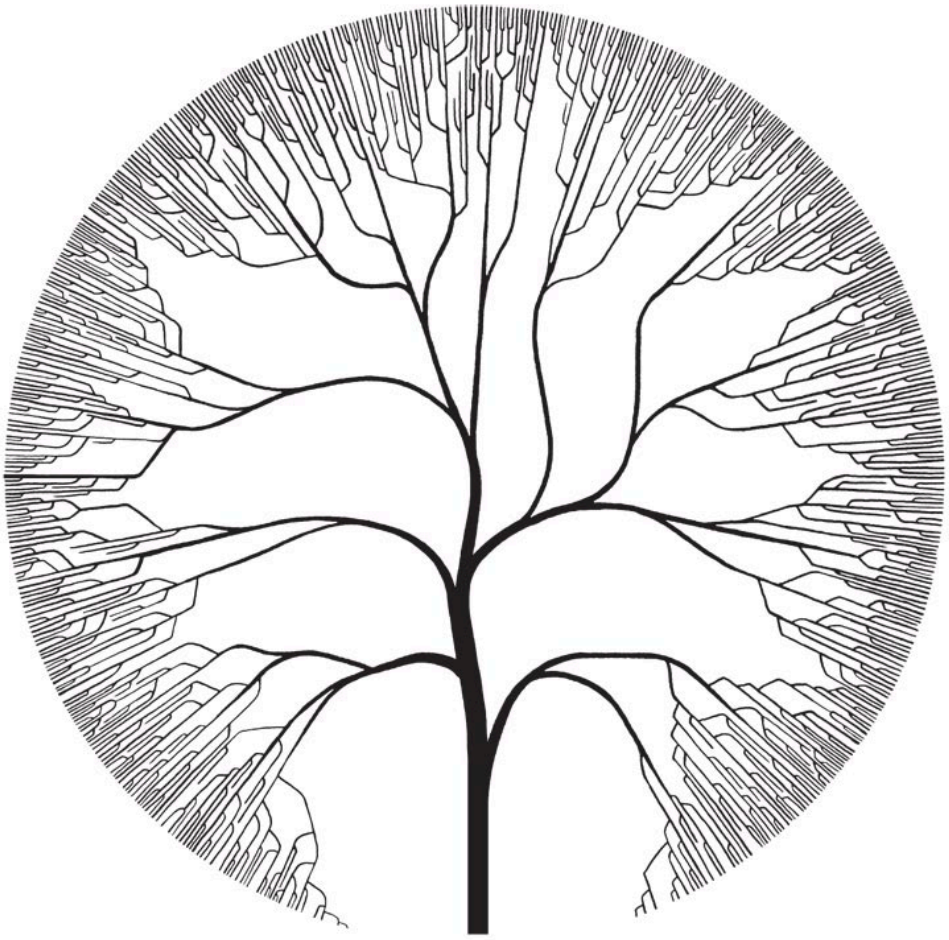
Może się jednak okazać, że sposób zarządzania informacjami w pewnej skali ułatwia zrozumienie działania tych mechanizmów w większych lub mniejszych systemach. Na przykład logika stojąca za modułami zwrotnymi, które kontrolują enzymy metaboliczne, regulują pracę genów i podtrzymują homeostazę organizmu, będzie podobna do logiki rządzącej modułami zwrotnymi, które pozwalają ekologom z większą trafnością przewidywać,

jak zmieni się środowisko naturalne, gdy jakiś gatunek wymrze lub wyemigruje poza swoje dotychczasowe siedlisko w wyniku zmian klimatu albo zniszczenia jego miejsca zamieszkania.

Ze względu na swoje zainteresowanie chrząszczami, motylami i wszystkimi innymi insektami coraz bardziej niepokoję się spadającą liczbą oraz zmniejszającą się różnorodnością owadów występujących w wielu częściach świata. Najbardziej zaś martwi mnie to, że nie wiemy, dlaczego tak się dzieje. Czy chodzi o niszczenie ich habitatów, zmianę klimatu, monokultury upraw, zanieczyszczenie świetlne, nadmierne stosowanie środków owadobójczych? A może o coś jeszcze innego? Ludzie nauki proponują wiele wyjaśnień; niektórzy są pewni słuszności swoich teorii, ale prawda jest taka, że nie znamy jednoznacznej odpowiedzi. Jeśli mamy jakoś zahamować spadek populacji insektów, musimy zrozumieć, na czym polegają interakcje między nimi i resztą ich świata. W tym celu zaś musimy łączyć różne metody badań na przecięciu wielu dziedzin nauki. Należy też myśleć o tych problemach właśnie w perspektywie przetwarzania informacji.

Bez względu na to, na który poziom organizacji biologicznej spojrzymy, musimy rozumieć, jak zachodzi w nim proces zarządzania informacjami. To pozwoli nam przejść od opisywania złożoności do jej rozumienia. Kiedy już osiągniemy ten cel, dostrzeżemy, jak trzepoczące w powietrzu motyle, żywiące się cukrem bakterie, rozwijające się zarodki i wszystkie inne formy życia dokonują fundamentalnej przemiany informacji w wiedzę, z której mogą korzystać, by realizować swoje cele: przetrwanie, rozwój, reprodukcję i ewolucję.

Zaczynamy coraz lepiej pojmować chemiczne i informacyjne podstawy rozwoju życia na Ziemi. To zaś pomoże nam nie tylko zrozumieć reguły działania życia, ale też ingerować w sposób funkcjonowania organizmów żywych. Zanim spróbuję zdefiniować życie na podstawie tych pięciu zagadnień, które właśnie omówiliśmy, chciałbym się zastanowić, jak możemy korzystać z wiedzy biologicznej, by zmieniać świat.



Zmienianie świata

W 2012 roku miałem pojechać do antarktycznej stacji badawczej w Scott Base. Zawsze marzyłem, żeby odwiedzić tę rozległą zamarzniętą pustynię na biegunie południowym – dosłownie na końcu świata – i wreszcie nadarzyła się okazja. Przed wyprawą musiałem przejść rutynowe badania kontrolne, ale wyniki okazały się dalekie od normy. Po raz pierwszy w życiu musiałem się zmierzyć z własną śmiertelnością.

Okazało się, że cierpię na poważną chorobę serca. Po kilku tygodniach od tego nieprzyjemnego odkrycia zostałem poddany znieczuleniu i położony na stole operacyjnym. Chirurg rozciął mi pierś i znalazł uszkodzone naczynia krwionośne, które nie dostarczały mięśniom mojego serca dostatecznie wiele krwi. Następnie pobrał cztery krótkie odcinki tętnic z mojej piersi i fragment żyły z nogi, po czym przeszczepił je do mojego serca tak, by krew mogła omijać problematyczne miejsca. Kilka godzin później obudziłem się obolały i posiniaczony, ale z naprawionym sercem.

Ta operacja ocaliła mi życie. Poza wielkimi umiejętnościami i empatią personelu medycznego, który się mną zajmował, opierała się ona wyłącznie na zrozumieniu, czym jest życie. Wszystko, co robił, bazowało na znajomości ludzkiego ciała, jego tkanek, komórek i wewnętrznej chemii. Anestezjolożka miała pewność, że podane mi leki wprowadzą mój mózg w odwracalny stan utraty świadomości. Wpuszczono mi do serca roztwór, który na kilka godzin zupełnie zatrzymał jego bicie. Zawierał on potas w stężeniu dokładnie tak wysokim, by zmienić środowisko chemiczne w komórkach mięśni serca i doprowadzić do ich rozluźnienia. Pracę mojego serca i płuc przejęła maszyna prawidłowo utleniająca krew i pompująca ją we właściwym tempie. Podczas operacji i po jej zakończeniu podawano mi antybiotyki, żeby nie dopuścić do namnożenia się bakterii odpowiedzialnych za infekcje. Bez całej tej wiedzy o życiu może nie pisałbym dziś tych słów.

W miarę gdy coraz lepiej rozumiemy, czym jest życie, nabywamy wspaniałe zdolności manipulowania żywymi organizmami i zmieniania ich. Musimy jednak korzystać z nich właściwie. Żywe systemy są bardzo złożone, jeśli więc zaczniemy w nie ingerować bez dostatecznej wiedzy, możemy popełnić błąd i narobić więcej szkody niż pożytku.

W ciągu wieków ludzie najczęściej umierali nie ze starości, lecz z powodu chorób zakaźnych. Ataki przypuszczane na nasze ciała przez bakterie, wirusy, grzyby, glisty oraz najróżniejsze inne pasożyty i plagi zakończyły miliony żywotów, z czego wiele jeszcze w niemowlęctwie. Dżuma dymienicza, która przetoczyła się przez świat w XIV wieku, zabiła niemal połowę mieszkańców Europy. Przez większą część naszej historii śmierć była stale obecna w codziennym życiu.

Dziś sytuacja wygląda już inaczej. Tam gdzie ludzie mają dostęp do szczepionek, leków antymikrobiotycznych i środków sanitarnych, możliwe jest zapobieganie wielu dawniej śmiertelnym chorobom zakaźnym, hamowanie ich rozwoju, a także leczenie osób nimi zarażonych. Nawet wirus HIV, jeszcze niedawno uważany przez niektórych za kolejną wielką plagę, teraz przy właściwym leczeniu może zostać ustabilizowany i traktowany jak kontrolowana choroba przewlekła. Po tysiącach lat rozwoju medycyny, w dużej mierze na podstawie przesądów, mglistych wyjaśnień i najróżniejszych niesprawdzonych, często ryzykownych sposobów leczenia, taka odmiana to prawdziwy cud. Wszystko wynika z naszej znajomości życia, zdobywanej metodami naukowymi, a następnie wykorzystywanej w otaczającym nas świecie.

Wciąż jednak mamy przed sobą długą drogę w walce z zalewającymi nas od wieków falami chorób zakaźnych. Piszę te słowa wiosną 2020 roku, kiedy pandemia koronawirusa sieje spustoszenie na wszystkich kontynentach. Infekcje wirusowe, tak jak ta wywoływana przez COVID-19, często kończą się w najlepszym razie ciężką chorobą, a w najgorszym – śmiercią. Epidemia wirusa ebola, która przetoczyła się w 2014 i 2015 roku przez Afrykę Zachodnią, doprowadziła do niezwykle sprawnego opracowania skutecznych szczepionek, ale takie interwencje mają sens

tylko wtedy, gdy docierają do potrzebujących odpowiednio szybko. Zarówno w bogatych, jak i ubogich krajach wielu ludzi nadal nie ma dostępu do metod leczenia o potwierdzonej skuteczności. Zdumiewa też, że politycy w niektórych krajach rozwiniętych zignorowali zalecenia naukowców i ekspertów i znieśli środki ostrożności, przez co dali sygnał, że epidemii i pandemii nie trzeba postrzegać jako zjawisk bardzo niebezpiecznych. Te zaniedbania już teraz są tragiczne w skutkach. Ludzkość powinna jak najprędzej naprawić ten błąd.

Te i ci z nas, którzy mają szczęście żyć w krajach o wysokim poziomie opieki medycznej, powinni być głęboko wdzięczni za ochronę, jaka została nad nimi roztoczona. Poziom rozwoju społeczeństwa można mierzyć właśnie tym, że zabieg taki jak operacja serca, którą zapewniła mi brytyjska służba zdrowia (National Health Service), jest darmowa w momencie udzielania pomocy – sytuacja finansowa pacjenta nie gra roli. System opieki zdrowotnej wymagający uiszczania opłat za każdy zabieg na bieżąco karze najuboższych, a ubezpieczenie oparte na kalkulacji ryzyka – najbardziej potrzebujących. W przestrzeni publicznej wypowiadają się też ludzie otwarcie krytykujący bezpieczeństwo i skuteczność szczepionek, choć nie mają na to dostatecznych dowodów. Osoby te powinny pamiętać, że odrzucanie sprawdzonych, przetestowanych klinicznie szczepionek to decyzja o charakterze moralnym. Podejmując ją, antyszczepionkowcy sprowadzają zagrożenie nie tylko na siebie i swoje rodziny, lecz również na całe otoczenie, gdyż niszczą odporność stadną, przez co choroby zakaźne łatwiej się rozprzestrzeniają.

Nigdy nie wygramy z chorobami zakaźnymi raz na zawsze – a to za sprawą ewolucji drogą doboru naturalnego. Większość bakterii i wirusów rozmnaża się w szybkim tempie, więc ich geny również prędko dostosowują się do nowej sytuacji. To zaś oznacza, że w każdej chwili mogą się pojawić nowe szczepy tej samej choroby, które nieustannie ewoluują i znajdują coraz bardziej pomysłowe sposoby na przechytrzenie naszych leków i systemów odpornościowych. Właśnie dlatego antybiotykoodporność stanowi tak wielkie zagrożenie. Proces doboru

naturalnego zachodzi na naszych oczach, a jego konsekwencje są przerażające. Wystawianie bakterii na działanie antybiotyków bez zabicia ich wszystkich zwiększa prawdopodobieństwo, że wykształcą odporność na lek. To dlatego przyjmowanie właściwej dawki antybiotyków – i tylko kiedy naprawdę ich potrzebujemy – jest takie ważne, podobnie jak zażycie całej przepisanej ilości leku, nawet jeśli objawy ustąpią wcześniej. W przeciwnym razie stwarzamy zagrożenie nie tylko dla własnego zdrowia, lecz także dla innych. Równie niebezpieczne – o ile nie bardziej – jest podawanie niskich dawek antybiotyków zwierzętom na farmach przemysłowych, by szybciej rosły.

Jesteśmy właśnie świadkami pojawiania się szczepów bakterii odpornych na wszystkie interwencje człowieka; choroby przez nie wywoływane stają się nieuleczalne. Takie uodpornione bakterie mogą cofnąć medycynę w rozwoju, zagrażając milionom żyć. Wyobraź sobie świat, w którym ty i twoi bliscy możecie złapać infekcję, której nie da się wyleczyć, od zadraśnięcia kolcem róży, zadrapania psim pazurem czy nawet w wyniku wizyty w szpitalu. To nie znaczy jednak, że czeka nas tak ponura przyszłość. Rozpoznanie problemu to pierwszy krok do jego rozwiązania. Jesteśmy w stanie i musimy ostrożniej korzystać z antybiotyków, które mamy do dyspozycji. Możemy też opracowywać lepsze sposoby wykrywania i śledzenia infekcji lekoodpornych, wynajdować nowe antybiotyki i zapewniać właściwe wsparcie pracującym nad nimi ludziom. Do rozwiązania tego problemu będziemy potrzebować całej naszej wiedzy o życiu – możliwe, że zależy od tego przyszłość ludzkości.

Wraz z rozwojem opieki zdrowotnej i stopniowym odparciem zagrożenia w postaci wielu chorób zakaźnych przewidywana długość życia powoli rosła. W związku z tym musieliśmy jednak zacząć się mierzyć z całym wachlarzem przykrych dolegliwości, takich jak choroby serca, cukrzyca, różne choroby natury psychicznej, a także nowotwory. Ich głównymi przyczynami są podeszły wiek i niezdrowy styl życia. W skali globalnej te schorzenia są coraz powszechniejsze i stanowią poważne wyzwanie

zarówno dla cierpiących na nie osób, jak i dla ludzi nauki, którzy próbują je zrozumieć i leczyć.

Na przykład nowotwór – to nie jedna choroba, lecz wiele różnych. Każda jest inna, a powszechność ich występowania zmienia się z czasem, więc zaawansowany nowotwór często przypomina niezależny ekosystem z wieloma różnymi rodzajami komórek, z których każda zawiera inne mutacje genetyczne. To również stanowi konsekwencję ewolucji drogą doboru naturalnego. Nowotwór powstaje, gdy komórki zaczynają podlegać nowym zmianom genetycznym i mutacjom nakazującym im niekontrolowany podział i wzrost. Te choroby świetnie sobie radzą, ponieważ mają przewagę selektywną: mogą zmonopolizować zasoby organizmu, wytworzyć tyle zmutowanych komórek, że przeważą one nad otaczającymi je zdrowymi, a także ignorować sygnały ze strony organizmu, nakazującego im się zatrzymać.

Niektóre z najbardziej obiecujących nowych metod leczenia nowotworów zostają opracowywane w wyniku naszego coraz lepszego rozumienia istoty życia. Na przykład immunoterapia nowotworu polega na nauczeniu systemu odpornościowego organizmu, by rozpoznawał i atakował komórki nowotworowe. To inteligentne podejście, bo system immunologiczny jest w stanie przypuszczać bardzo precyzyjne ataki na komórki nowotworowe, ignorując te zdrowe w pobliżu. Nowe sposoby leczenia tworzone są również za sprawą odkryć, których dokonałem ze swoim zespołem, gdy pracowaliśmy nad cyklem komórkowym skromnych drożdży. Leki wiążące się z kinazami cyklinozależnymi występującymi w ludzkim ciele i dezaktywujące je są dziś coraz częściej wykorzystywane w terapii raka piersi u kobiet. Cztery dekady temu nie miałem pojęcia, że praca nad komórkami drożdży doprowadzi bezpośrednio do leczenia nowotworu. Ponieważ stanowi on nieunikniony skutek zdolności komórki do adaptacji i ewolucji, nigdy nie zdołamy się go całkiem pozbyć. Im lepiej jednak będziemy pojmować mechanizmy sterujące życiem, tym łatwiejsze stanie się wczesne wykrywanie komórek nowotworowych i ich skuteczne

eliminowanie. Jestem pewien, że w przyszłości nowotwór nie będzie już budzić takiego przerażenia jak dzisiaj.

Dekodowanie informacji w naszych genach to droga, która może przyspieszyć postępy w walce z nowotworem. Gdy pierwsza wersja sekwencji DNA ludzkiego genomu ujrzała światło dzienne w 2003 roku, wkroczyliśmy na nowy etap w rozwoju medycyny prewencyjnej. Osoby zaangażowane w to odkrycie miały nadzieję, że dzięki niemu stworzymy świat, w którym możliwa będzie precyzyjna ocena ryzyka genetycznego każdej osoby już przy narodzinach, łącznie z przewidywaniami, jak nasze genetyczne predyspozycje będą się zmieniać przy konkretnej diecie czy stylu życia. Wprowadzenie tego celu w życie stanowi jednak ogromne wyzwanie – zarówno od strony naukowej, jak i etycznej.

Odpowiada za to po części ogromna złożoność życia. Bardzo niewiele cech ludzkiego organizmu zachowuje się tak przewidywalnie jak sadzonki groszku, które Mendel badał w swoim ogrodzie. Wśród chorób wywoływanych w podobny sposób – przez wadliwe wersje pojedynczego genu – znajdują się choroba Huntingtona, mukowiscydoza i hemofilia. Wszystkie one powodują wiele cierpienia i bólu, ale dotykają względnie niewielką część populacji. Najpowszechniejsze choroby i zaburzenia, takie jak choroby serca, nowotwory i choroba Alzheimera, są zaś wywoływane przez wiele czynników. Powodują je wspólne działania różnych genów, które w skomplikowany i nieprzewidywalny sposób wchodzą w interakcje ze sobą i z naszym środowiskiem. Nauka zaczyna już rozplątywać złożone łańcuchy przyczynowo-skutkowe łączące człowieka z otoczeniem, ale postępy w tej dziedzinie są powolne i osiągane z wielkim trudem.

Właśnie tu na pierwszy plan wysuwa się rozumienie życia jako procesu przetwarzania informacji. Naukowcy zbierają obecnie ogromne ilości danych – w tym sekwencje genów, szczegóły stylu życia i historii medycznej milionów ludzi. Wysnucie jednoznacznych wniosków z tak szerokiej próby to jednak niełatwe zadanie. Interakcje między genami a otoczeniem są tak złożone, że w badaniu tych procesów osiągamy już

granice możliwości dostępnych nam technologii, w tym najnowszych rozwiązań, takich jak systemy uczące się.

Mimo to dokonujemy przydatnych odkryć w tej dziedzinie. Możliwe jest już korzystanie z profilowania genetycznego do identyfikacji osób obciążonych na przykład większym ryzykiem chorób serca czy otyłości. Możemy korzystać z tych informacji, by na wczesnym etapie zalecać tym osobom prowadzenie właściwego stylu życia i dobierać leki precyzyjnie odpowiadające ich indywidualnym potrzebom. To postęp, ale wraz z coraz rzetelniejszym odczytywaniem naszych predyspozycji zdrowotnych z genomów musimy też poważnie zastanowić się nad tym, jak najlepiej korzystać z tej wiedzy.

Dokładne przewidywanie chorób na podstawie informacji genetycznych będzie stanowić szczególny kłopot dla systemów opieki medycznej, które są opłacane przez prywatne ubezpieczenia zdrowotne. Bez ścisłej kontroli sposobów wykorzystywania informacji genetycznej może dojść do sytuacji, w której osoby obciążone ryzykiem genetycznym będą uznawane za niekwalifikujące się do ubezpieczenia, zaczną się spotykać z odmowami udzielenia pomocy lub zostaną zmuszone do płacenia wyższych stawek, choć w niczym nie zawiniły. Do takich sytuacji nie dojdzie w krajach, które zapewniają darmową opiekę medyczną, gdyż możliwe będzie wykorzystywanie zdobyczy genetyki do sprawniejszego przewidywania, diagnozowania i leczenia chorób. Nie zawsze jednak łatwo jest żyć z taką wiedzą. Czy naprawdę chcielibyśmy znać najbardziej prawdopodobną przyczynę swojej śmierci, gdyby nauka rozwinęła się do takiego stopnia, by określać to z dużą dozą prawdopodobieństwa?

Do tego dochodzi odkrywanie predyspozycji genetycznych wpływających na aspekty niemedyczne, takie jak ogólna inteligencja i przyswajanie wiedzy. Im więcej dowiadujemy się o różnicach genetycznych między jednostkami, płciami i całymi populacjami, tym ważniejsze jest zagwarantowanie, że taka wiedza nie zostanie uznana za podstawę do dyskryminacji.

Równolegle z naszymi możliwościami w zakresie odczytywania genomów rozwija się zdolność człowieka do ich edytowania i przepisywania. Służy do tego enzym CRISPR-Cas9 – to potężne narzędzie, działające jak molekularne nożyczki. Z jego pomocą możemy dokonywać niezwykle precyzyjnych nacięć w strukturze DNA, by dodawać, usuwać lub zmieniać sekwencje genów. Nazywamy to edycją genów lub edycją genomu. Już od lat osiemdziesiątych wykonuje się te procedury na prostych organizmach, takich jak drożdże (to jeden z powodów, dla których postanowiłem pracować nad komórkami *S. pombe*), ale zastosowanie enzymu CRISPR-Cas9 sprawia, że dziś możemy edytować DNA z nieporównanie większą prędkością, precyzją i skutecznością niż kiedyś. Pozwala on też na łatwiejsze edytowanie genów wielu innych gatunków, włączając w to ludzi.

Z czasem możemy się spodziewać nowych terapii i sposobów leczenia bazujących na komórkach z edytowanymi genami. Naukowczynie i naukowcy już teraz wytwarzają komórki odporne na konkretne infekcje, na przykład HIV, i używają ich do atakowania zmian nowotworowych. Na tym etapie jednak próby edytowania ludzkich zarodków na wczesnym etapie rozwoju są bardzo nieodpowiedzialne – takie działania poskutkowałyby trwałą zmianą genetyczną wszystkich komórek tego człowieka i całego jego potomstwa. Obecnie istnieje ryzyko, że terapie genetyczne przypadkowo zmieniłyby inne geny w danym genomie, lecz nawet gdyby udawało się bezpiecznie edytować tylko wybrany gen, taka ingerencja mogłaby mieć trudne do przewidzenia i potencjalnie niebezpieczne skutki uboczne. Na razie po prostu nie rozumiemy istoty naszych genomów dość dobrze, by wiedzieć na pewno, co się wydarzy. Być może w przyszłości ta metoda zostanie uznana za dość bezpieczną, by uwolnić całe rodziny od pewnych zaburzeń genetycznych, takich jak choroba Huntingtona czy mukowiscydoza. Należy jednak pamiętać, że wykorzystywanie edycji genów w celu „ulepszenia” potomstwa – na przykład poprzez podniesienie poziomu inteligencji, poprawienie urody czy zwiększenie predyspozycji sportowych – to zupełnie co innego.

Współczesna genetyka to jedna z najmętniejszych pod względem etycznym dziedzin zastosowania biologii do zmieniania życia ludzkiego. Stosowanie genetyki do tworzenia designerskich dzieci to dziś tylko abstrakcja, ale w nadchodzących dekadach wielu przyszłych rodziców będzie zmuszonych do zmierzenia się z nowymi dylematami wraz z rozwojem medycyny i nauki. Będziemy w stanie coraz lepiej określać predyspozycje genetyczne, modyfikować geny i edytować ludzkie zarodki i komórki. Wszystkie te kwestie muszą zostać omówione przez całą ludzką społeczność już teraz.

Postępy osiągane w biologii komórkowej mają ogromne znaczenie również na końcowym odcinku ludzkiego życia – opracowujemy coraz lepsze sposoby leczenia chorób zwyrodnieniowych. Weźmy na przykład komórki macierzyste: są to komórki przechowywane przez organizm w stanie niedojrzałości, takie jak te obecne w zarodku na wczesnym etapie rozwoju. Najważniejszą właściwością komórek macierzystych jest zdolność ciągłego podziału, by tworzyć nowe komórki, które następnie mogą przejmować bardziej wyspecjalizowane role. Rosnący płód i organizm niemowlęcia mają w sobie dużą liczbę komórek macierzystych, bo wciąż potrzebują nowych. Komórki macierzyste utrzymują się jednak w wielu różnych częściach ludzkiego organizmu długo po tym, jak przestał on ich nieustannie potrzebować. Każdego dnia miliony komórek w twoim ciele obumierają lub stają się nieprzydatne. Właśnie dlatego twoja skóra, mięśnie, wyściółka żołądka i jelit, kąciki rogówki w oczach i wiele innych tkanek w ciele zawierają zbiory komórek macierzystych.

W ostatnich latach nauka poszukuje sposobu na wyizolowanie oraz hodowanie komórek macierzystych, by zachęcać je do rozwoju w konkretnych narządach – na przykład w nerwach, wątrobie czy mięśniach. Potrafimy już przejąć zupełnie dojrzałe komórki ze skóry pacjenta i poddać je zabiegom odwracającym bieg zegara biologicznego, by sprowadzić je z powrotem do stanu komórek macierzystych. To roztacza przed nami ekscytujące wizje: być może pewnego dnia wystarczy pobrać próbkę DNA z wewnętrznej strony policzka, aby wygenerować z niej niemal każdy rodzaj komórki w ciele. Jeśli ludzie nauki wspólnie z personelem

medycznym w pełni opanują te techniki i z całą pewnością uznają je za bezpieczne, być może zdołają dzięki nim opracować rewolucyjny sposób leczenia chorób zwyrodnieniowych czy trwałych urazów, rewolucjonizując tym samym operacje przeszczepiania organów. Może się nawet okazać możliwe odwracanie nieuleczalnych obecnie chorób systemu nerwowego i mięśni, na przykład choroby Parkinsona czy dystrofii mięśniowej.

Ten postęp rozbudza odważne wizje – wiele z nich ma swój początek w firmach z Doliny Krzemowej – nadchodzącej wielkimi krokami przyszłości, w której będzie możliwe zatrzymanie, a nawet odwrócenie procesu starzenia. Nie wolno jednak pozwalać, żeby te wizje odrywały się od rzeczywistości. Osobiście nie zamierzam po śmierci konserwować swojego mózgu ani ciała w procesie krioprezerwacji w nadziei, że w odległej przyszłości zostanę obudzony, odmłodzony i utrzymany przy życiu na całą wieczność – co jest bardzo mało prawdopodobne. Starość jest skumulowanym produktem końcowym uszkodzeń, śmierci i zaprogramowanego zawczasu wyłączania się komórek i systemów organów w ciele. Nawet u zdrowych ludzi skóra traci elastyczność, a mięśnie siłę, system odpornościowy gorzej reaguje, serce słabnie. Nie ma jednej przyczyny wszystkich tych procesów, a zatem można wątpić, czy kiedykolwiek pojawi się proste remedium na starzenie się. Jestem jednak pewien, że w nadchodzących dekadach przewidywana długość życia jeszcze wzrośnie, a także – co ważne – jego jakość w podeszłym wieku się poprawi. Nie będziemy żyć wiecznie, ale będziemy mieć do dyspozycji coraz bardziej wyrafinowane metody leczenia, łączące terapię komórkami macierzystymi, nowe leki i terapie genetyczne z promocją zdrowego stylu życia. To zaś umożliwi regenerację wielu elementów organizmu i przywracanie sprawności osób starszych i chorych.

Zastosowanie wiedzy z zakresu biologii nie tylko zrewolucjonizowało naszą zdolność leczenia chorych i dysfunkcyjnych ciał, lecz także pozwoliło na rozkwit całej ludzkości. Już dziesięć tysięcy lat przed naszą erą światowa populacja odnotowała gwałtowny przyrost, bo nasi przodkowie zaczęli uprawiać rolę. Wtedy nie zdawali sobie z tego sprawy,

ale udomowienie zwierząt i roślin stało się możliwe za sprawą stosowanych przez nich metod doboru sztucznego. Ich wysiłki zostały nagrodzone o wiele większymi zasobami pożywienia, które od tego czasu zdobywali z regularnością.

Prehistoryczny skok populacji to jeszcze nic w porównaniu z tym, jak zwiększyła się ona za mojego życia. Urodziłem się w 1949 roku i od tamtej pory liczba ludzi zamieszkujących naszą planetę prawie się potroiła. To oznacza, że każdego dnia mamy do wykarmienia prawie pięć miliardów osób więcej, choć żywność produkowana jest wciąż na mniej więcej takiej samej przestrzeni rolnej. Umożliwiła to zielona rewolucja, którą zapoczątkowano w latach pięćdziesiątych XX wieku. Obejmowała ona rozwój systemów nawadniających, nawozów sztucznych, kontroli szkodników, a przede wszystkim doprowadziła do wykształcenia nowych gatunków podstawowych produktów spożywczych. W przeciwieństwie do naszych przodków rolników naukowcy pracujący nad rozwiązaniami zielonej rewolucji mieli do dyspozycji całą dostępną człowiekowi wiedzę na temat genetyki, biochemii, botaniki i ewolucji, by tworzyć nowe odmiany roślin. Eksperyment zakończył się niezwykłym sukcesem i doprowadził do powstania nowych odmian roślin, dających o wiele większe plony niż dawniej. Nie obyło się jednak bez ukrytych kosztów. Niektóre ze stosowanych dziś intensywnych praktyk rolniczych są szkodliwe dla ziemi, pracy rolników, a także dla innych gatunków, z którymi nowe rośliny dzielą środowisko. To, jak dużo jedzenia marnuje się każdego dnia, to skandal, z którym musimy wreszcie skończyć. Mimo to należy przyznać, że gdyby nie ten ogromny zastrzyk wiedzy z zakresu biologii, jaki rolnictwo otrzymało w minionym wieku, miliony ludzi umierałoby z głodu każdego roku.

Globalna populacja wciąż rośnie. Jednocześnie wzrasta niepokój o szkody wyrządzane planecie i środowisku w wyniku działalności człowieka. Już wkrótce będziemy musieli zmierzyć się z podwójnym wyzwaniem: jak generować możliwie największe plony, a przy tym zmniejszać nasz negatywny wpływ na środowisko. Przypuszczam, że trzeba

będzie wykroczyć poza metody, na których oparliśmy zeszłowieczną rewolucję rolniczą, i stworzyć jeszcze wydajniejsze i bardziej pomysłowe sposoby wytwarzania jedzenia.

Niestety od lat dziewięćdziesiątych często blokuje się próby projektowania genetycznie modyfikowanych odmian roślin i zwierząt o lepszych cechach. Zazwyczaj dzieje się to bez poparcia naukowymi dowodami ani głębokiego zrozumienia tej idei. Byłem świadkiem wielu debat o bezpieczeństwie GMO, które wykolejały się na przekręconych danych, niewłaściwie skierowanym lobbowaniu, a także celowym podkładaniu nieprawdziwych informacji. Weźmy na przykład ryż złoty – odmianę zmodyfikowaną genetycznie; do chromosomu ryżu siewnego dodano gen pewnej bakterii, przez co roślina wytwarza duże ilości witaminy A. Szacuje się, że na świecie dwieście pięćdziesiąt milionów dzieci w wieku przedszkolnym cierpi na niedobór witaminy A, co w dużej mierze przyczynia się do utraty przez nie wzroku i ich śmierci. Ryż złoty mógłby w łatwy sposób rozwiązać ten problem, ale prace nad tą rośliną były wielokrotnie sabotowane przez organizacje pozarządowe i walczące o ochronę środowiska. Doszło nawet do zniszczenia pól ze zbiorami testowymi, hodowanymi właśnie po to, by zbadać bezpieczeństwo ryżu i jego wpływ na środowisko.

Czy naprawdę powinniśmy uniemożliwiać najbiedniejszym dostęp do wynalazków, które mogłyby poprawić ich stan zdrowia i zapewnić wyżywienie, zwłaszcza jeśli ta odmowa opiera się na chwilowych modach i niedoinformowaniu zamiast na nauce? W produktach spożywczych wytwarzanych metodami modyfikacji genetycznej nie ma nic samoistnie niebezpiecznego czy trującego. Powinniśmy pamiętać, że wszystkie rośliny i zwierzęta rolne powinny być testowane pod kątem bezpieczeństwa, wydajności i przewidywanych szkód wyrządzanych środowisku i gospodarce – bez względu na to, w jaki sposób są hodowane. Musimy brać pod uwagę, co naukowcy mają do powiedzenia na temat ryzyka i korzyści z hodowli danej odmiany czy gatunku. Tych informacji nie mogą przesłaniać interesy wielkich korporacji, stanowiska ideologiczne

organizacji pozarządowych ani sytuacja finansowa któregokolwiek z tych sektorów.

W nadchodzących dekadach będziemy musieli coraz częściej korzystać z technik inżynierii genetycznej. Może się okazać, że na tę dziedzinę wielki wpływ będzie miała dość nowa gałąź nauki, jaką jest biologia syntetyczna. Biolożki i biolodzy syntetyczni wychodzą poza bardziej skoncentrowane i przyrostowe podejście stosowane zazwyczaj w inżynierii genetycznej, a zamiast tego wprowadzają bardziej radykalne zmiany w programowaniu genetycznym organizmów.

Niesie to za sobą poważne wyzwania technologiczne – pojawiają się również pytania o to, jak zamierzamy kontrolować nowe gatunki – lecz sprostanie im może przynieść wielkie korzyści. Chemia życia dostosowuje się znacznie łatwiej i jest o wiele bardziej wydajna niż większość procesów chemicznych, jakie udało nam się kiedykolwiek przeprowadzić w laboratoriach i zakładach produkcyjnych. Mając do dyspozycji zdobycze inżynierii genetycznej i biologii syntetycznej, będziemy mogli na nowo porządkować wyjątkową chemię życia i wyznaczać jej nowe cele. Z czasem powinniśmy być w stanie stosować biologię syntetyczną do tworzenia roślin i zwierząt hodowlanych o wyższej wartości odżywczej, ale możliwości tej dziedziny sięgają jeszcze dalej. Być może zdołamy wytwarzać przeorganizowane biologicznie rośliny, zwierzęta i mikroby, które staną się zdolne do produkcji zupełnie nowych rodzajów leków, paliw, tkanin i materiałów budowlanych.

Nowe, przeprogramowane systemy biologiczne mogłyby nawet pomóc w powstrzymaniu katastrofy klimatycznej. Ludzie nauki są zgodni co do tego, że nasza planeta weszła w fazę przyspieszającego globalnego ocieplenia. Stanowi to bardzo poważne zagrożenie dla naszej przyszłości oraz dla przyszłości całej biosfery, którą zbudowaliśmy i której częścią jesteśmy. Coraz pilniejsze staje się znalezienie sposobu na obniżenie poziomu gazów cieplarnianych, które emitujemy do atmosfery, i zmniejszenie postępującego ocieplenia. Gdybyśmy mogli przeprogramować rośliny tak, by dokonywały fotosyntezy w jeszcze

wydajniejszy sposób, albo opracowali sposób na przeprowadzanie tego procesu na skalę przemysłową, poza ciasnymi ścianami żywych komórek, może udałoby się nam tworzyć paliwa biologiczne i hodowle zapewniające neutralność klimatyczną. Być może nauka zdoła też wytworzyć nowe odmiany roślin, które znakomicie radziłyby sobie w trudnych warunkach, na przykład na zniszczonych glebach lub na terenach podatnych na suszę, gdzie rolnictwo nie jest obecnie możliwe. Takie rośliny nie tylko mogłyby posłużyć jako pożywienie dla dużej części świata, ale też pozwoliłyby na obniżenie poziomu dwutlenku węgla – przechwytywałyby go, ułatwiając przeciwdziałanie katastrofie klimatycznej. Mogłyby też dać początek żywym, samowystarczalnym fabrykom. Zamiast polegać na paliwach kopalnych, być może w przyszłości będziemy potrafili wytwarzać systemy biologiczne lepiej wykorzystujące odpadki, resztki i energię słoneczną.

Oprócz stworzenia zmodyfikowanych form życia mamy drugi cel, jakim jest doprowadzenie do tego, by naturalnie występujące organizmy dokonujące fotosyntezy zajmowały jak największą część powierzchni Ziemi. To nie takie proste, jak mogłoby się wydawać na pierwszy rzut oka. Aby dokonać widocznej zmiany, należałoby wprowadzić ją na ogromną skalę. Musimy też pamiętać, że rośliny z czasem obumierają lub są zbierane przez rolników, a ilość dwutlenku węgla do usunięcia z powietrza się nie zmniejsza. Rozwiązaniem mogłyby być sadzenie lasów, hodowle alg i wodorostów w oceanach, a także umożliwianie łatwiejszego tworzenia się torfowisk. Aby jednak jakiekolwiek rozwiązanie zadziałało dość skutecznie i szybko, będziemy musieli do granic wykorzystywać nasze pojmowanie dynamiki ekologicznej. Ciągłe, niewyjaśnione wymieranie owadów na dużą skalę to dobra ilustracja tego problemu. Nasza przyszłość jest związana z życiem insektów, bo to one zapylają nasze zbiory, wzbogacają glebę i robią wiele innych potrzebnych rzeczy.

Postęp w tych aspektach wymaga lepszego rozumienia życia i sposobów jego działania. Biolożki i biolodzy ze wszystkich dziedzin – molekularni i komórkowi, genetyczki, botanicy, zoolożki, ekolodzy i inni – muszą współpracować, by umożliwić ludzkości dalszy rozwój razem z resztą

biosfery, a nie jej kosztem. Aby to nam się udało, musimy zmierzyć się ze skalą naszej ignorancji. Pomimo wielkich postępów w rozumieniu, jak działa życie, nasze obecne pojmowanie tego zagadnienia jest częściowe, a w niektórych aspektach bardzo skąpe. Jeśli chcemy dokonywać dalszych konstruktywnych – i bezpiecznych – interwencji w żywe systemy, musimy się jeszcze wiele nauczyć.

Rozwijanie technologii i opracowywanie nowych rozwiązań powinno zawsze iść ramię w ramię ze staraniami lepszego zrozumienia, jak działa życie. Chemik George Porter, laureat Nagrody Nobla, stwierdził kiedyś, że dokarmianie nauk stosowanych kosztem głodzenia ich podstaw teoretycznych jest jak oszczędzanie na fundamentach budynku, żeby mógł być wyższy. To tylko kwestia czasu, kiedy cała budowla się posypie. W myśl tej samej zasady nie wolno nam jednak poświęcać się wyłącznie teorii bez świadomości, że przy każdej nadarzającej się okazji musimy szukać dla naszych odkryć pożytecznych zastosowań. Mamy obowiązek wykorzystywać naszą wiedzę dla dobra ogółu, zawsze gdy jest to możliwe.

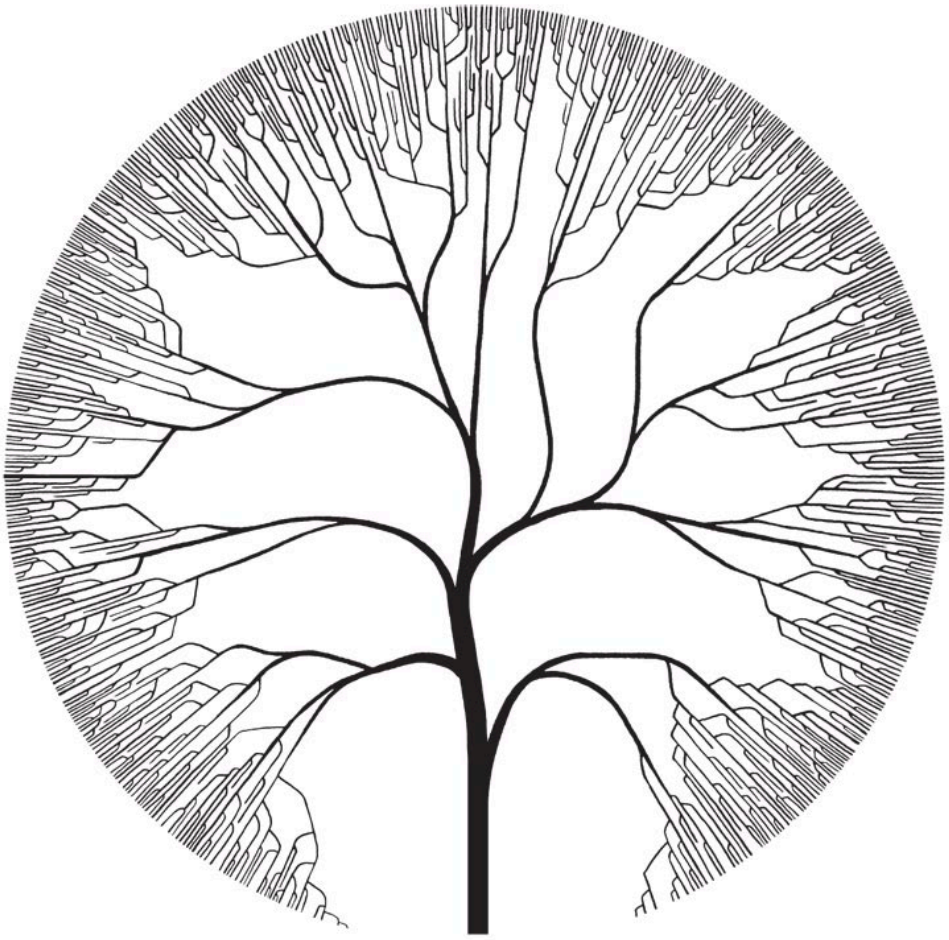
Ta deklaracja rodzi jednak nowe pytania i problemy. Skąd mamy wiedzieć, czym jest „dobro ogółu”? Jeśli nowe terapie raka okażą się astronomicznie drogie, to kto powinien mieć do nich dostęp, a kto nie? Czy promowanie idei antyszczepionkowych bez dostatecznych dowodów lub niewłaściwe stosowanie antybiotyków należałoby uznać za przestępstwo? A czy należałoby tak samo karać wykroczenia, gdyby było wiadomo, że duży wpływ na sprawcę miały jego predyspozycje genetyczne? Jeśli edycja genów linii zarodkowej może wyeliminować z rodziny występowanie choroby Huntingtona, to czy te osoby powinny mieć dostęp do takiego rozwiązania? Czy klonowanie ludzi jest akceptowalne w jakiejkolwiek sytuacji? A jeśli zapobieganie katastrofie klimatycznej wiązałoby się z zasiedleniem oceanów miliardami zmodyfikowanych genetycznie alg, to czy należy tak uczynić?

To zaledwie kilka spośród wielu coraz pilniejszych i niekiedy bardzo osobistych pytań, które stawia przed nami coraz lepsza znajomość istoty życia. Jedynym sposobem na znalezienie możliwych do zaakceptowania

odpowiedzi jest prowadzenie ciągłej, szczerej i otwartej debaty. Ludzie nauki odegrają w tych debatach szczególną rolę, bo to oni będą musieli w zrozumiały sposób wyjaśnić, jakie korzyści, ryzyko i zagrożenie niesie za sobą każdy krok naprzód. Nie zmienia to jednak faktu, że ta dyskusja powinna przebiegać z udziałem całego społeczeństwa. Przywódczynie i przywódcy polityczni muszą głęboko zaangażować się w te sprawy. Zbyt mało z nich przykłada dziś dostateczną wagę do ogromnego wpływu nauki i technologii na nasze życie i gospodarkę.

Pamiętajmy jednak, że to nauka powinna grać pierwsze skrzypce, a nie polityka. Świat już zbyt wiele razy przekonał się, jak straszliwe skutki następują, kiedy ludziom w pierwszej kolejności przyświecają cele polityczne. Podczas zimnej wojny Związek Radziecki był w stanie zbudować bombę atomową i wysłać pierwszego człowieka w kosmos; prace nad badaniami genetycznymi i rozwojem rolnictwa jednak poważnie ucierpiały, bo Stalin z powodów ideologicznych poparł szarlatana Trofima Łysenkę, który odrzucał zasady genetyki Mendla. Wskutek tej decyzji mieszkańcy ZSRR umierali z głodu. W niedalekiej przeszłości mieliśmy okazję obserwować opóźnienia w działaniach z powodu ludzi zaprzeczających zmianom klimatycznym, ignorujących lub podważających odkrycia naukowe. Dysputy o dobru publicznym muszą bazować na wiedzy, faktach i racjonalnym myśleniu, a nie na ideologii, nieudowodnionych przekonaniach, chciwości bądź politycznych interesach.

Pamiętajmy jednak, że wartość samej wiedzy nie podlega żadnym dyskusjom. Świat potrzebuje nauki i postępów, jakie ona ze sobą niesie. Jako świadomi, pomysłowi i kierowani ciekawością ludzie mamy niezwykłą szansę wykorzystać nasze rozumienie natury życia do zmiany świata. To od nas zależy, czy zrobimy wszystko, co w naszej mocy, by sprawić, że życie na Ziemi stanie się lepsze – nie tylko dla nas i naszego najbliższego otoczenia, ale też dla wszystkich przyszłych pokoleń i dla ekosystemów, których nierozerwalną częścią jesteśmy. Otaczający nas świat nie tylko dostarcza nam nieskończenie wielu zachwytów, ale też utrzymuje nas przy życiu.



Czym jest życie?

To wielkie pytanie. W szkole uczono mnie, że organizmy żywe charakteryzuje zbiór konkretnych cech: ruch, oddychanie, wrażliwość na bodźce, zdolność do wzrostu, reprodukcja, wydalanie i odżywianie. Takie wyjaśnienie dobrze podsumowuje, co robią żywe organizmy, ale nie stanowi wyczerpującego wyjaśnienia istoty życia. Dlatego chciałbym podejść do tego od innej strony. Po pięciu rozdziałach, w których omówiliśmy najważniejsze idee świata biologii, przedstawię teraz zestaw najważniejszych zasad, według których możemy zdefiniować życie. Te reguły pozwolą nam lepiej zrozumieć, jak ono działa, co je zapoczątkowało i na czym polega natura relacji wiążących całe życie na naszej planecie.

Oczywiście wiele osób przede mną usiłowało odpowiedzieć na to samo pytanie. Erwin Schrödinger podkreślał wagę dziedziczenia i informacji w wyprzedzającej swoje czasy książce *Czym jest życie?* z 1944 roku. Badacz przekonywał w niej o istnieniu „zakodowanego scenariusza dziedziczenia”[1] – dziś wiemy, że jest on zapisany w DNA. Schrödinger zakończył swoją książkę sugestią niemal graniczącą z ideą witalizmu: twierdził, że do wyjaśnienia natury życia konieczne będzie nieodkryte jeszcze prawo fizyki.

Kilka lat później radykalny brytyjsko-hinduski biolog J.B.S. Haldane również napisał książkę pod tym samym tytułem[2], w której zadeklarował: „Nie zamierzam odpowiadać na to pytanie. Wątpię, czy w ogóle będzie to kiedykolwiek możliwe”. Haldane porównał uczucie bycia żywym do postrzegania koloru, bólu czy wysiłku, wskazując, że „nie da się opisać tych rzeczy na podstawie czegokolwiek innego”. Rozumiem podejście Haldane’a, lecz muszę przyznać, że taka definicja kojarzy mi się z wypowiedzią sędziego amerykańskiego Sądu Najwyższego Pottera Stewarta, który w 1964 roku zdefiniował pornografię słowami: „Rozpoznam ją, kiedy ją zobaczę”.

Nagrodzony Noblem genetyk Hermann Joseph Muller już się tak nie wahał. W 1966 roku przedstawił „zredukowaną” definicję żyjącego organizmu jako „czegoś, co jest zdolne do ewolucji”. Muller miał rację, uznając Darwinowską ideę ewolucji metodą doboru naturalnego za podstawową zasadę myślenia o życiu. To jedyny znany nam mechanizm zdolny generować różnorodne, zorganizowane i działające celowo żywe istoty bez udziału nadprzyrodzonej siły wyższej.

Zdolność do ewolucji drogą doboru naturalnego to pierwsza zasada, jaką się posłużę, by zdefiniować życie. W rozdziale o doborze naturalnym przekonaliśmy się, że proces ten zależy od trzech fundamentalnych cech istot żywych. Aby ewoluować, organizmy żywe muszą się reprodukować, być wyposażone w system dziedziczenia, a system ów musi charakteryzować się pewną zmiennością. Każdy byt posiadający te trzy cechy może i będzie ewoluować.

Moja druga zasada mówi, że wszystkie formy życia są ograniczonymi przestrzennie fizycznymi bytami, oddzielnymi od swojego środowiska, lecz zdolnymi się z nim komunikować. Wnioskujemy to z obserwacji komórki – najprostszego organizmu, który zawiera w sobie wszystkie najważniejsze cechy istoty żywej. Ta zasada opiera się na fizyczności, wykluczającej z definicji życia programy komputerowe i kultury, choć one również mogą sprawiać wrażenie, że ewoluują.

Moja trzecia zasada głosi, że organizmy żywe to systemy chemiczne, fizyczne i przetwarzające informacje. Kreują one własny proces metaboliczny i wykorzystują go do utrzymywania się przy życiu, do rozwoju i reprodukcji. Owe żywe maszyny są koordynowane i regulowane przez proces zarządzania informacjami, co sprawia, że mogą działać celowo jako niezależne jednostki.

Te trzy zasady razem wzięte definiują życie. Każdy byt funkcjonujący według nich wszystkich może zostać uznany za żywy.

Należałoby w tym miejscu poświęcić więcej uwagi na wyjaśnienie, jak działa ta niezwykła chemia umożliwiająca zaistnienie życia. Najważniejszą jej cechą jest to, że bazuje na dużych molekułach polimerowych

stworzonych głównie z połączonych ze sobą atomów węgla. Jednym z takich polimerów jest DNA, którego podstawowym zadaniem jest stabilne i długotrwałe przechowywanie danych. W tym celu DNA chroni najistotniejsze elementy, w których zapisane są informacje – zasady nukleinowe – w samym środku helisy, gdzie są stabilne i dobrze chronione. DNA zabezpiecza je tak dobrze, że naukowcy badający starożytne próbki byli w stanie sekwencjonować DNA pozyskane z organizmów, które żyły i umarły bardzo dawno temu – wśród nich był na przykład koń tkwiący w wiecznej zmarzlinie przez prawie milion lat!

Informacje przechowywane w sekwencjach genów nie mogą jednak być zupełnie niedostępne i nieruchome. Muszą się zmieniać w działania, by generować aktywności metaboliczne i struktury fizyczne składające się na istotę życia. Informacje przechowywane w stabilnym chemicznie i niezbyt ciekawym pakunku DNA muszą być przekładane na aktywne chemicznie molekuły białek.

Białka również są polimerami węgla, ale – w przeciwieństwie do DNA – większość zmiennych chemicznie elementów białek znajduje się na zewnątrz molekuły polimerowej. To oznacza, że nadają one białkom trójwymiarową formę i wchodzą w interakcje ze światem, co pozwala im wykonywać najróżniejsze funkcje związane z budowaniem, podtrzymywaniem działania i reprodukcją żywego organizmu. Białka różnią się od DNA również tym, że jeśli zostaną uszkodzone lub zniszczone, komórka może je łatwo zastąpić, budując nową molekułę.

Nie wyobrażam sobie bardziej eleganckiego rozwiązania: różne konfiguracje linearnych polimerów węgla tworzą chemicznie stabilne przechowalnie informacji, ale są też zdolne generować ogromnie różnorodne działania. Uważam ten aspekt chemii życia za bardzo prosty i zarazem absolutnie niezwykły. To, jak życie łączy złożoną chemię polimerową z linearnym przechowywaniem informacji, stanowi rozwiązanie tak genialne, że nie zdziwiłbym się, gdyby stanowiło nie tylko podstawę życia na Ziemi, ale też w jakimkolwiek innym zakątku wszechświata, o ile gdzieś jeszcze ono istnieje.

Każda znana nam forma życia jest zależna od polimerów węglowych, ale nie powinniśmy przez to ograniczać naszego myślenia o życiu tylko do jego ziemskiej chemii. Niewykluczone, że w innych częściach kosmosu życie wykorzystuje cząsteczki węgla na inne sposoby albo w ogóle nie jest z nich zbudowane. Brytyjski chemik i biolog molekularny Graham Cairns-Smith w latach sześćdziesiątych zasugerował, że mogłyby zaistnieć prymitywne formy życia stworzone na przykład z replikujących się cząsteczek glinokrzemianów.

Cairns-Smith wyobrażał sobie cząsteczki podobne do molekuł krzemu – to popularny wybór wśród autorów literatury science fiction tworzących w swych utworach wyobrażone formy życia pozaziemskiego. Podobnie jak w przypadku węgla atomy krzemu mogą tworzyć do czterech wiązań chemicznych. Wiemy też, że powstają z nich polimery stanowiące podstawę szczeliw silikonowych, klejów, lubrykantów i przyrządów kuchennych. Polimery krzemowe mogą być na tyle duże i zróżnicowane, by zawierać informacje biologiczne, ale życie na Ziemi jest zbudowane z węgla, mimo że krzem występuje na naszej planecie o wiele powszechniej. Może to być spowodowane tym, że w warunkach panujących na powierzchni naszej planety krzem nie tworzy wiązań chemicznych z innymi atomami równie łatwo co węgiel, nie zdołał więc osiągnąć dostatecznej różnorodności chemicznej, by powstało z niego życie. Głupotą byłoby jednak zupełnie wykluczać możliwość zaistnienia życia z cząsteczek krzemu lub na podstawie nawet zupełnie odmiennych od znanych nam formuł chemicznych. Być może znakomicie poradziłoby sobie ono w innych warunkach gdzieś w odległej części kosmosu.

Podczas rozmyślań o istocie życia łatwo ulec pokusie zakreślenia radykalnej granicy między życiem a nie-życiem. Komórki są niewątpliwie żywe, podobnie jak wszystkie organizmy, jakie z nich powstają, ale oprócz nich istnieje wiele bytów o mniej jednoznacznym statusie.

Najlepszym przykładem są wirusy. To jednostki chemiczne posiadające genomy zbudowane z DNA lub RNA zawierającego geny potrzebne do wytworzenia płaszcza proteinowego, który chroni wirusa. Wirusy mogą

ewoluować w procesie doboru naturalnego, tym samym zdając test Mullera, ale później sprawy się komplikują. Przede wszystkim wirusy nie mogą się reprodukować. Jedynym ich sposobem na rozmnożenie się jest infekowanie komórek żywych organizmów i przejmowanie kontroli nad ich systemem metabolicznym.

To znaczy, że kiedy się przeziębiasz, wirusy przenikają do komórek wyścielających wnętrze twojego nosa i wykorzystują ich enzymy oraz budulec do swojej wielokrotnej reprodukcji. Namnażają się tak bardzo, że zainfekowana komórka w nosie w końcu pęka, uwalniając tysiące wirusów, które z kolei infekują pobliskie komórki i przedostają się do twojego krwiobiegu, by zarażać komórki w innych częściach organizmu. To bardzo skuteczna strategia na przetrwanie, lecz wynika z niej, że wirus nie może istnieć niezależnie od środowiska komórkowego swojego gospodarza. Innymi słowy jest on całkowicie zależny od innego żywego organizmu. Można uznać, że wirusy zmieniają swój stan między byciem żywymi (gdy są aktywne chemicznie i reprodukują się w organizmie gospodarza) oraz niebyciem żywymi (kiedy istnieją jako bezczynne chemicznie wirusy poza przestrzenią komórki).

Niektórzy biolodzy uważają, że bezwzględna zależność wirusów od innych organizmów oznacza, że nie są one tak naprawdę żywe. Nie powinniśmy jednak zapominać, że niemal wszystkie inne formy życia, łącznie z człowiekiem, również są zależne od innych istot.

Twoje ciało jest w rzeczywistości ekosystemem stworzonym z mieszanki komórek ludzkich i nie-ludzkich. Zawieramy w sobie różnorodne społeczności bakterii, archeonów, grzybów i eukariontów jednokomórkowych, żyjących na nas i wewnątrz nas – swoją liczbą przewyższają trzydzieści bilionów naszych własnych komórek. Wielu ludzi nosi w sobie bądź na sobie także większe organizmy, takie jak różne glisty jelitowe i roztocza o ośmiu odnóżach, które żyją na powierzchni skóry i składają jajeczka w naszych mieszkach włosowych. Wielu z naszych intymnych nie-ludzkich towarzyszy jest w dużym stopniu zależnych od naszych komórek i organizmów, ale my też potrzebujemy do życia

niektórych z nich. Na przykład bakterie obecne w naszym systemie trawiennym wytwarzają pewne aminokwasy i witaminy, których nasze komórki nie potrafią wyprodukować samodzielnie.

Nie możemy też zapominać, że każdy kęs jedzenia, jakie spożywamy, powstał za sprawą niezależnych od nas form życia. Nawet mikroby – takie jak drożdże, które badam – są całkowicie zależne od molekuł produkowanych zazwyczaj przez inne żywe organizmy, na przykład glukozy czy amoniaku, potrzebnych do tworzenia makromolekuł zawierających cząsteczki węgla i azotu.

Rośliny sprawiają wrażenie bardziej niezależnych. Mogą pobierać dwutlenek węgla z powietrza i wodę z ziemi, a następnie wykorzystywać energię słoneczną do syntezowania wielu bardziej złożonych molekuł, których potrzebują, w tym polimerów węgla. Nawet rośliny muszą jednak polegać na bakteriach żyjących wewnątrz lub w pobliżu ich korzeni, wychwytujących azot z atmosfery. Bez tych bakterii nie są one w stanie wytwarzać makromolekuł życia. O ile nam wiadomo, żadna odmiana eukariontów nie jest w stanie zapewnić sobie tego samodzielnie. To oznacza, że nie istnieje ani jeden znany nam gatunek zwierząt, roślin czy grzybów zdolny do generowania całej swojej chemii komórkowej od zera.

Być może zatem naprawdę niezależnymi formami życia – jedynymi, które mogłyby zostać uznane za w pełni niezależne i „wolnożyjące” – są te, które na pierwszy rzut oka uznalibyśmy za dość prymitywne. Wśród nich znajdują się mikroskopijnie małe cyjanobakterie, nazywane też sinicami. Potrafią one zarówno dokonywać fotosyntezy, jak i samodzielnie wychwytywać azot z atmosfery. Innym przykładem są archeony, czerpiące całą energię z aktywnych wulkanicznie ujść hydrotermalnych głęboko w morzu. Co zdumiewające, te stosunkowo proste organizmy nie tylko przetrwały na Ziemi o wiele dłużej od nas, ale też są od nas o wiele bardziej samowystarczalne.

Głęboka współzależność różnych form życia znajduje swoje odzwierciedlenie również w podstawowej strukturze naszych komórek. Mitochondria wytwarzające potrzebną nam energię były kiedyś zupełnie

odrębnymi bakteriami, które opanowały zdolność produkcji ATP. Za sprawą jakiegoś zrządzenia losu półtora miliarda lat temu niektóre z tych bakterii zamieszkały w innych komórkach. Z biegiem czasu komórki gospodarze stały się do tego stopnia zależne od swoich bakteryjnych gości, że zaabsorbowały mitochondria na stałe. Przypieczętowanie tej wzajemnie korzystnej relacji prawdopodobnie zapoczątkowało rozwój zupełnie nowego rodzaju eukariontów. Za sprawą stabilnych dostaw energii komórki eukariotyczne mogły osiągać większe rozmiary i przybierać bardziej złożone formy. To zaś przyspieszyło rozwój niezliczonych gatunków zwierząt, roślin i grzybów.

Wszystko to pokazuje, że organizmy żywe istnieją w hierarchicznym spektrum rozciągającym się od zupełnie zależnych od gospodarza wirusów aż po bardzo samowystarczalne cyjanobakterie, archeony i rośliny. Moim zdaniem wszystkie te bardzo różne organizmy są żywe, gdyż stanowią samorządne jednostki fizyczne, zdolne do ewolucji drogą doboru naturalnego, choć jednocześnie wszystkie są w mniejszym lub większym stopniu zależne od innych form życia.

Z tak szerokiej perspektywy na to, czym jest życie, wyłania się bogatsza wizja całego świata wokół nas. Życie na Ziemi, bez żadnych wyjątków, należy do jednego misternie splecionego ekosystemu, który zawiera w sobie wszystkie organizmy. Ta fundamentalna więź bierze się nie tylko z głębokiej współzależności, ale też z faktu, że całe życie na naszej planecie jest ze sobą genetycznie spokrewnione za sprawą wspólnych korzeni ewolucyjnych. Ekolodzy od dawna zwracają uwagę na to, jak ważna jest łączność i współzależność wszystkich form życia. Ich podejście wywodzi się z wniosków wyprowadzonych przez żyjącego w osiemnastym i dziewiętnastym wieku odkrywcę i naturalistę Alexandra von Humboldta, który twierdził, że wszystkie istoty żywe są ze sobą zespolone holistyczną siecią powiązań. Może to dość niespodziewane, ale właśnie ta wszechzależność stanowi podstawę całego życia na Ziemi. To powinno nas skłonić do głębszego zastanowienia się nad wpływem działalności człowieka na otaczający go świat.

Organizmy zamieszkujące gałęzie naszego wspólnego drzewa genealogicznego przybierają niesamowitą mnogość form. Ich różnorodność ustępuje jednak miejsca znacznie większym, fundamentalnym podobieństwom. Żywe organizmy to chemiczne, fizyczne i przetwarzające informacje byty, operujące zasadniczo w taki sam sposób. Na przykład wszystkie stosują jedną walutę energetyczną, jaką jest molekuła ATP, polegają na tych samych podstawowych związkach między DNA, RNA i białkami, a także wykorzystują rybosomy do tworzenia białek. Francis Crick twierdził, że przepływ informacji z DNA do RNA, a z RNA do białek stanowi podstawowy mechanizm życia, dlatego nazwał go centralnym dogmatem biologii molekularnej. Od tamtego czasu pojawiały się głosy wskazujące na drobne wyjątki od tej reguły, ale ogólnie rzecz biorąc, obserwacja Cricka jest nadal aktualna.

Głębokie podobieństwa na poziomie chemicznych podstaw życia wskazują na niezwykle istotny wniosek: życie istniejące obecnie na Ziemi miało tylko jeden początek. Istnieje niemal zerowe prawdopodobieństwo, że podstawowe procesy zachodzące we wszystkich żywych organizmach byłyby aż tak podobne, gdyby ich przodkowie w różnych formach kilkukrotnie pojawili się na świecie niezależnie od siebie i przetrwali.

Jeśli całe życie na Ziemi stanowi część tego samego potężnego drzewa genealogicznego, to z jakiego nasienia ono wyrosło? Bardzo dawno temu gdzieś na Ziemi nieożywione i rozproszone cząsteczki chemiczne w jakiś sposób ułożyły się w bardziej uporządkowane formy, które były w stanie trwać, powielać się i wreszcie nabyć najważniejszą ze wszystkich umiejętność – ewoluować drogą doboru naturalnego. Ale jak ta historia – w której ostatecznie pojawiliśmy się też my – właściwie się zaczęła?

Ziemia ukształtowała się nieco ponad cztery i pół miliarda lat temu, u zarania istnienia Układu Słonecznego. Przez pierwsze pół miliarda lat powierzchnia naszej planety była zbyt gorąca i niestabilna, by mogło się na niej pojawić życie w takiej formie, jaką znamy dzisiaj. Najstarsze jednoznacznie rozpoznane skamieliny organizmów żywych, jakie udało

nam się dotychczas znaleźć, mają trzy i pół miliarda lat. To oznacza, że życie miało kilkaset milionów lat, żeby się pojawić i zadomowić na Ziemi. Nasze umysły nie są w stanie wyobrazić sobie tak długiego odcinka czasu, ale to nadal zaledwie ułamek całej historii życia. Francis Crick uważał za nieprawdopodobne, by życie zdołało się rozwinąć na Ziemi tak szybko. Dlatego sugerował, że musiało ono mieć swój początek w innej części wszechświata i trafiło na naszą planetę w stanie całkowicie lub częściowo wykształconym. Teoria Cricka unika jednak odpowiedzi na nasze najważniejsze pytanie, zamiast wyjaśniać, jak życie mogło uformować się ze skromniejszych początków. Dziś możemy zaprezentować wiarygodną (choć obecnie jeszcze niemożliwą do udowodnienia) wersję wydarzeń.

Najstarsze skamieliny nie różnią się zbytnio od niektórych istniejących do dziś bakterii. To wskazuje, że życie już wtedy mogło być dość dobrze rozwinięte – istniały komórki zamknięte w błonach komórkowych, system dziedziczenia z udziałem DNA, a także metabolizm bazujący na białkach.

Co jednak pojawiło się jako pierwsze? Replikacja genów na podstawie DNA, metabolizm białkowy czy błony komórkowe? W żyjących dziś organizmach te systemy tworzą współzależną sieć połączeń i mogą działać poprawnie tylko jako jedna całość. Geny zapisane w DNA mogą się replikować wyłącznie za pomocą enzymów białkowych. Enzymy te zaś nie powstaną bez instrukcji zawartych w DNA. Jak jeden z tych procesów mógłby istnieć bez drugiego? Do tego dochodzi też fakt, że zarówno geny, jak i metabolizm są zależne od błony komórkowej, która zawiera potrzebne związki chemiczne, przechwytuje energię i chroni swoją zawartość przed szkodliwym działaniem otoczenia. Wiemy jednak, że żyjące obecnie komórki wykorzystują do misternego konstruowania swoich błon geny i enzymy. Trudno sobie wyobrazić, by któryś element tej niezbywalnej trójcy – genów, białek i błon – mógł pojawić się niezależnie od pozostałych: wystarczy odjąć jeden czynnik, by cały system natychmiast się rozsypał.

Powstanie błon komórkowych jest najłatwiejsze do prześledzenia. Wiemy, że molekuły lipidowe odpowiedzialne za ich powstawanie mogą

formować się w wyniku spontanicznie zachodzących reakcji z udziałem substancji i w warunkach, które prawdopodobnie istniały już na młodej Ziemi. Kiedy zaś naukowcy umieszczają te lipidy w wodzie, dzieje się coś niespodziewanego: cząsteczki spontanicznie się łączą, tworząc puste w środku kule z błony, mniej więcej tego samego kształtu i rozmiaru co komórki niektórych bakterii.

Skoro poznaliśmy już możliwy mechanizm formowania się jednostek otoczonych błoną komórkową, pozostaje nam do rozstrzygnięcia, co pojawiło się wcześniej: DNA czy białka. To pytanie tego samego rodzaju co dylemat jajka i kury. Ani jedno, ani drugie! To najlepsza odpowiedź zaproponowana jak dotąd przez naukowców. Bardzo możliwe, że palma pierwszeństwa przypadła chemicznemu kuzynowi DNA, czyli RNA.

Molekuły RNA są w stanie przechowywać informacje, podobnie jak DNA. Mogą być również kopiowane z marginesem błędu, który umożliwia zróżnicowanie rezultatów. To oznacza, że RNA jest zdolną do ewolucji molekułą dziedziczną. Niektóre wirusy do dziś korzystają z niej w procesie replikacji. Inną fundamentalną właściwością molekuł RNA jest to, że mogą tworzyć bardziej wyrafinowane trójwymiarowe struktury zdolne do funkcjonowania jako enzymy. Wprawdzie enzymy powstałe na bazie RNA nie są ani trochę tak skomplikowane czy wszechstronne jak enzymy białkowe, ale potrafią katalizować pewne reakcje chemiczne. Na przykład niektóre enzymy stanowiące podstawę funkcjonowania dzisiejszych rybosomów są zrobione z RNA. Gdyby te dwie cechy RNA się połączyły, możliwe byłoby powstawanie molekuł RNA pełniących jednocześnie funkcję genu i enzymu: system dziedziczenia i prymitywny układ metaboliczny w jednym. To zaś prowadziłoby do powstania samowystarczalnego żywego mechanizmu, zbudowanego na podstawie RNA.

Jedna z teorii głosi, że te systemy zbudowane na RNA mogły się ukształtować w skałach otaczających ujścia hydrotermalne na dnie oceanu. Maleńkie szczeliny w kamieniu zapewniały bezpieczne środowisko rozwoju, a aktywność wulkaniczna tuż pod skorupą ziemską – stałe

dostawy energii i surowców chemicznych. W takich okolicznościach prostsze molekuły mogły stworzyć nukleotydy potrzebne do wykształcenia polimerów RNA. Niewykluczone, że z początku to atomy metalu zagnieżdżone w skałach służyły za katalizatory chemiczne, pozwalając tym samym na przebieg reakcji bez wsparcia ze strony enzymów biologicznych. Wreszcie, po tysiącleciach prób i błędów, mechanizm ten doprowadził do powstania organicznych maszyn z RNA, które były żywe, samowystarczalne i zdolne do replikacji. Jakiś czas później systemy te zostały prawdopodobnie zamknięte w błony komórkowe, co uczyniło z nich niezależne jednostki. To wydarzenie stanowiło krok milowy w wykształceniu się życia na Ziemi: doszło do pojawienia się pierwszych prawdziwych komórek.

Historia, którą właśnie przedstawiłem, mogła się wydarzyć, ale pamiętajmy, że to tylko spekulacja. Pierwsze formy życia nie zostawiły po sobie żadnych śladów, więc bardzo trudno nam stwierdzić, co dokładnie stało się na początku istnienia życia na naszej planecie, a nawet w jakim dokładnie stanie była ona trzy i pół miliarda lat temu.

Łatwiej nam sobie wyobrazić dalszy ciąg tej opowieści, już po ukształtowaniu się pierwszych komórek. Najpierw jednokomórkowe mikroby rozprzestrzeniły się stopniowo po świecie, kolonizując oceany, lądy i powietrze. Następnie, jakieś dwa miliardy lat później, dołączyły do nich większe i bardziej złożone, lecz jeszcze przez długi czas jednokomórkowe eukarionty. Prawdziwe wielokomórkowe organizmy eukariotyczne pojawiły się po upłynięciu kolejnego miliarda lat. To oznacza, że życie wielokomórkowe istnieje od mniej więcej sześciuset milionów lat, co stanowi zaledwie jedną szóstą całej historii życia na Ziemi. W tym czasie eukarionty zdążyły jednak przekształcić się w największe i najbardziej rzucające się w oczy formy życia wokół nas, takie jak potężne lasy, ogromne kolonie mrówek, labirynty sieci podziemnych grzybów, stada ssaków na afrykańskiej sawannie, a od bardzo niedawna również ludzka cywilizacja.

Wszystko to odbywało się za sprawą ślepego i nieprzewidywalnego procesu ewolucji drogą doboru naturalnego, który okazał się jednak niesamowicie twórczy. Mimo to, kiedy myślimy o sukcesie rozwoju życia, musimy pamiętać, że każda zmiana ewolucyjna zachodzi dopiero wtedy, gdy część populacji ginie i nie pozostawia potomstwa. Zatem życie ogółem jest niezłomne, trwałe i zdolne do adaptacji, lecz indywidualne jego formy mają często ograniczony czas istnienia i ograniczoną umiejętność dostosowania się do zmian otoczenia. Właśnie tu wkracza dobór naturalny: zabija stary porządek, by utorować ścieżkę nowemu, jeśli lepiej przystosowane warianty już istnieją w danej populacji. Okazuje się, że życie może powstawać tylko poprzez śmierć.

Bezlitosny proces odsiewania najsłabszych i najgorzej przystosowanych doprowadził do pojawienia się wielu nieprzewidzianych zjawisk. Jednym z najniezwyklejszych osiągnięć ewolucji jest ludzki mózg. O ile nam dziś wiadomo, żadne inne stworzenie nie ma aż tak zaawansowanej świadomości własnego istnienia jak człowiek. Nasze samoświadome umysły musiały ewoluować – przynajmniej częściowo – by umożliwić nam zmiany naszego zachowania wraz z przeistaczającym się światem. W przeciwieństwie do motyli, a może nawet wszystkich znanych nam organizmów, człowiek może świadomie obierać sobie cele i zastanawiać się nad motywami własnego działania.

Działanie ludzkiego mózgu bazuje na identycznej chemii i fizyce co wszystkie inne żywe systemy. A jednak te same proste molekuły i znane procesy umożliwiają nam myślenie, zastanawianie się, pracę wyobraźni, twórcze działania i cierpienie. Jak to wszystko wyłania się z mokrej chemii naszego mózgu? To zagadnienie prowadzi do całej gamy bardzo trudnych pytań.

Wiemy, że nasz system nerwowy powstaje na podstawie niezwykle skomplikowanego mechanizmu interakcji między miliardami komórek nerwowych (neuronów) tworzących między sobą tryliony połączeń, które nazywamy synapsami. Te niewyobrażalnie misterne i ciągle zmieniające się

sieci połączonych neuronów razem tworzą szlaki sygnałowe przesyłające i przetwarzające szerokie strumienie informacji elektrycznych.

Jak to często bywa w dziedzinie biologii, większość tych schematów zrozumieliśmy dzięki badaniom prowadzonym na prostszych organizmach „modelowych", takich jak glisty, muchy i myszy. Wiemy już sporo o tym, jak systemy nerwowe tych stworzeń wychwytują informacje ze środowiska za pomocą narządów zmysłów. Ludzie nauki skrupulatnie śledzili ruchy sygnałów wizualnych, dźwiękowych, dotykowych, zapachowych i smakowych płynących przez system nerwowy. Zdołali też stworzyć mapy części połączeń neuronowych odpowiedzialnych za tworzenie wspomnień, generowanie reakcji emocjonalnych i zachowań takich jak napinanie mięśni.

Te wszystkie odkrycia są bardzo ważne, ale stanowią dopiero początek naszej pracy. Zdołaliśmy zaledwie zadrasnąć powierzchnię wiedzy o tym, jak interakcje między miliardami indywidualnych neuronów łączą się, by wytwarzać abstrakcyjne myśli, samoświadomość i to, co uznajemy za wolną wolę. Znalezienie satysfakcjonujących odpowiedzi na te pytania prawdopodobnie zajmie nam cały dwudziesty pierwszy wiek, a może i dłużej. Nie uważam, że dążąc do tego celu, należy polegać wyłącznie na narzędziach dostarczanych przez tradycyjnie rozumiane nauki przyrodnicze. W naszych poszukiwaniach trzeba będzie uwzględnić także odkrycia poczynione w dziedzinie psychologii, filozofii oraz naukach humanistycznych ogółem. Warto również czerpać z informatyki i dziedzin jej pokrewnych. Najpotężniejsze dostępne dziś programy z wbudowanymi modułami sztucznej inteligencji są stworzone tak, by naśladowały – w bardzo uproszczony sposób – to, jak żywe sieci neuronowe przetwarzają informacje.

Te programy komputerowe są w stanie wiele osiągnąć na polu analizy danych, ale nie mają do zaoferowania nic, co mogłoby choć trochę przypominać myślenie abstrakcyjne, wyobraźnię lub samoświadomość. Nawet zdefiniowanie tych pojęć jest bardzo trudne. W tym zadaniu mogłyby nam pomóc osoby zajmujące się literaturą, poezją lub sztuką –

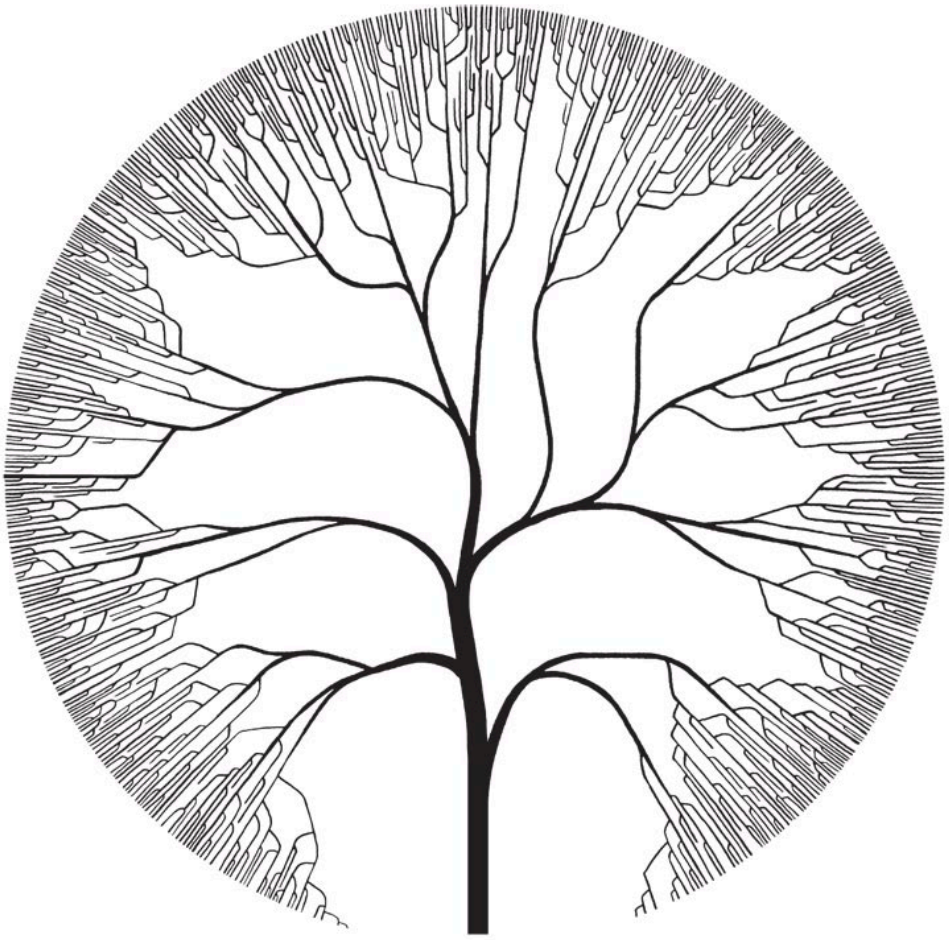
tworząc podstawy kreatywnego myślenia poprzez lepsze opisywanie różnych stanów emocjonalnych lub głębszą analizę tego, czym właściwie jest istnienie. Jeśli zdołamy opracować bardziej ujednolicony język – lub przynajmniej szersze sieci pojęciowe – łączący nauki humanistyczne i ścisłe przy omawianiu tych zjawisk, będziemy lepiej przygotowani do zrozumienia, jak i dlaczego ewolucja pozwoliła nam rozwijać się w formie systemów chemicznych i informacyjnych, które z czasem uświadomiły sobie własne istnienie. Będziemy musieli wykorzystać całą naszą wyobraźnię i kreatywność, by zrozumieć, z czego się one biorą.

Wszechświat jest niewyobrażalnie wielki. Wedle zasad prawdopodobieństwa jest bardzo wątpliwe, by przez cały ten czas i na tak ogromnej przestrzeni życie – nie wspominając nawet o życiu inteligentnym – rozwinęło się tylko raz, na Ziemi. To, czy kiedykolwiek uda się nam poznać obce formy życia, stanowi zupełnie inne zagadnienie. Jeśli jednak do tego dojdzie, jestem pewien, że one również okażą się samowystarczalnymi chemicznymi i fizycznymi istotami zbudowanymi na bazie kodujących informacje polimerów i powstałymi za sprawą ewolucji drogą doboru naturalnego – tak samo jak my.

Nasza planeta to jedyny zakątek wszechświata, o którym wiemy na pewno, że istnieje na nim życie, i jest ono czymś niesamowitym. Ciągle nas zaskakuje, lecz pomimo swej niewiarygodnej różnorodności poddaje się naukowym analizom, a jego zrozumienie w fundamentalny sposób umożliwia rozwój naszej kultury i cywilizacji. Coraz lepsze pojmowanie istoty życia może poprawić los całej ludzkości. Ta wiedza idzie jednak jeszcze dalej. Biologia pokazuje nam, że wszystkie żywe organizmy, jakie znamy, są spokrewnione i wchodzą w bliskie interakcje ze sobą nawzajem. Wszyscy jesteśmy połączeni siecią zależności łączącą całe życie na Ziemi: od biegających chrząszczy przez infekujące komórki bakterie, fermentujące drożdże, ciekawskie górskie goryle i trzepoczące skrzydełkami żółte motylki, które towarzyszyły nam w podróży przez strony tej książki, aż po każdy inny element naszej biosfery. Razem wszystkie te gatunki stanowią pomnik przetrwania życia na Ziemi – to najmłodsi potomkowie jednej

niezmierzenie rozległej rodziny, której przeszłość ciągnie się jednym nieprzerwanym łańcuchem podziałów komórek aż do najciemniejszych jaskiń czasu głębokiego.

O ile nam wiadomo, ludzie to jedyne formy życia dostrzegające tę więź i zastanawiające się nad jej znaczeniem. To zaś obarcza nas wyjątkową odpowiedzialnością za losy życia na naszej planecie, złożonego w całości z naszych bliższych i dalszych kuzynów. Należy się nią opiekować – to nasza najważniejsza powinność. Aby ją wypełnić, musimy rozumieć, czym jest życie.



Podziękowania

Jestem wdzięczny Davidowi i Rosie Ficklingom za ich wysiłki, by uczynić tę książkę jak najprzystępniejszą. Dziękuję też przyjaciołom i przyjaciółkom, współpracowniczkom i współpracownikom z mojego laboratorium i spoza niego – za lata dyskusji i sporów o naturę życia.

O autorze

Paul Nurse jest genetykiem i biologiem komórkowym, badającym systemy kontrolujące reprodukcję komórek. Ten proces stanowi podstawę wzrostu i rozwoju wszystkich żywych organizmów na świecie. Nurse jest dyrektorem Instytutu Francisa Cricka w Londynie. W przeszłości był przewodniczącym organizacji Cancer Research UK, rektorem Uniwersytetem Rockefellera i przewodniczącym Towarzystwa Królewskiego w Londynie. W 2001 roku został współlaureatem Nagrody Nobla w dziedzinie fizjologii lub medycyny. Został również wyróżniony Nagrodą Laskera i Medalem Copleya oraz Medalem Królewskim, przyznawanymi przez Towarzystwo Królewskie w Londynie.

W 1999 roku otrzymał tytuł szlachecki. W 2003 roku przyznano mu francuski Order Narodowy Legii Honorowej, a w 2018 – japoński Order Wschodzącego Słońca. Przez piętnaście lat zasiadał w brytyjskiej Radzie Nauki i Technologii, współpracującej z premierem i rządem Zjednoczonego Królestwa. Obecnie jest głównym doradcą naukowym Unii Europejskiej oraz członkiem zarządu Muzeum Brytyjskiego.

Paul Nurse ma licencję pilota i lata szybowcami oraz klasycznymi samolotami. Lubi teatr, muzykę klasyczną, wędrówki po górach, zwiedzanie muzeów i galerii sztuki, a także bardzo powolne bieganie.

Czym jest życie? to jego pierwsza książka.

Przypisy

[1] Erwin Schrödinger, *Czym jest życie?*, przeł. Stefan Amsterdamski, Warszawa 1998.

[2] Książka nie ukazała się dotąd w języku polskim [przyp. tłum.].